

UNIVERSIDAD DE PINAR DEL RÍO
“HERMANOS SAÍZ MONTES DE OCA”
FACULTAD DE GEOLOGÍA Y MECÁNICA



**INCIDENCIA DE LAS CONDICIONES INGENIERO
GEOLÓGICAS EN LA ZONACIÓN SÍSMICA LOCAL. CASO DE
ESTUDIO: PUEBLO DE SAN CRISTÓBAL Y ÁREAS ALEDAÑAS.**

**Tesis presentada en opción al Título Académico de Máster en Geología
(Mención Geología Ambiental)**

Autor: Ing. Alexis Ordaz Hernández

Tutor: Dr. C. Tomás Jacinto Chuy Rodríguez

Pinar del Río

2010

DECLARACIÓN DE AUTORIDAD

Los resultados que se exponen en la presente tesis se han alcanzado como consecuencia del trabajo realizado por el autor y asesorado y/o respaldado por el Unidad de Investigaciones para la Construcción de Pinar del Río, perteneciente a la Empresa Nacional de Investigaciones Aplicadas (ENIA), Centro Nacional de Investigaciones Sismológicas (CENAIIS) y Universidad de Pinar del Río “Hermanos Saíz Montes de Oca”.

Por tanto, los resultados en cuestión son propiedad del autor y de estas instituciones y solo ellas podrán hacer uso de los mismos de forma conjunta y recibir los beneficios que se deriven de su utilización.

DEDICATORIA

A Marquitos.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a toda mi familia, amigos y compañeros de trabajo que siempre estuvieron a mi lado.

Agradezco a Tony por su dedicación a esta tesis.

Agradezco a Chuy por su colaboración.

Agradezco a todos los técnicos y directivos de la ENIA por su contribución.

RESUMEN

Aunque la provincia de Pinar del Río se encuentra ubicada en una zona de sismicidad baja, se han reportado 32 sismos perceptibles hasta el año 2008, resultando el más destructor el ocurrido el 22 de enero de 1880 a las 23:10 hora local que afectó la zona de San Cristóbal-Candelaria, con una intensidad sísmica de 8 grados MSK y una magnitud de 5.9 en la escala de Richter, ocasionando pérdidas materiales de consideración.

La zonación sísmica (ZS) de las áreas urbanas ofrece la posibilidad de reducir la vulnerabilidad frente a eventos sísmicos, mediante la delimitación de zonas con diferentes niveles de intensidad o aceleración del terreno y elevada susceptibilidad a los fenómenos físico-geológicos inducidos.

La tesis presenta los resultados del análisis detallado de las condiciones ingeniero geológicas como base para la identificación de los potenciales escenarios de peligro sísmico en el pueblo de San Cristóbal y áreas aledañas. Se aplicaron tres métodos para la zonación sísmica local: analogías ingeniero geológicas, rigidez sísmica y coeficiente de amplificación del terreno, empleado este último por los proyectistas para la obtención de la aceleración sísmica de cálculo. Los parámetros empleados en la zonación sísmica local están almacenados en bases de datos digitales y sobre plataforma de sistema de información geográfica, permitiendo la actualización constante según el incremento del grado de estudio.

La peligrosidad sísmica local se clasificó en tres categorías: alta, media y baja, basado en el incremento de la intensidad sísmica respecto a la roca granítica y el comportamiento del coeficiente de amplificación del terreno.

Los resultados obtenidos deben considerarse en el futuro para el planeamiento urbano y un diseño arquitectónico-estructural adecuado. Constituyen, igualmente, un elemento de consulta para la Defensa Civil durante la preparación de planes de medidas para casos de terremotos.

ABSTRACT

Although Pinar del Rio province is located in a low seismic zone, 32 measurable earthquakes has been reported up to 2009, the most intensive one was the one that happened on January 22nd, 1880, at 23:10 local time in the zone of San Cristobal-Candelaria, with a seismic intensity of 8 MSK degrees and a magnitude of 5,9 in Richter scale, it had a considerable lost of goods.

The seismic zone of urban areas brings the possibility to reduce the vulnerability towards seismic events, through the delimitation of zones with different levels of acceleration and density in the field and high susceptibility to the physic-geologic phenomenon induced.

The thesis presents the results of a detail analysis in the geotechnical condition as base for the identification of the potential sceneries of seismic hazard in San Cristobal town and closest places. Three methods had been applied in the seismic zonation: geotechnical analogies, seismic tenseness and coefficient of widen land, using the last method by technicians to get the calculation of seismic acceleration. The parameters used in the local seismic zone are stored as digital data and over a geographic information system, it allows a permanent updated according to the grade of the studies. The local seismic hazard was classified in three categories: high, middle and low, considering the increment of the seismic intensity towards the granite rock and the behavior of the widen land coefficient.

The given results should be considered in the future for the urban planning and an adequate architect design; they represent a referee for Civil Defence for the training cases of earthquakes.

ÍNDICE

| | |
|---|-----------|
| INTRODUCCIÓN..... | 1 |
| Capítulo I. Marco teórico-referencial..... | 4 |
| I.1. Características generales de la sismicidad y el peligro sísmico en Cuba..... | 4 |
| I.2. Terremotos significativos recientes reportados en Cuba..... | 6 |
| I.3. Surgimiento, desarrollo y estudios de la zonificación sísmica en Cuba | 8 |
| I.3.1. Zonas sismogénicas..... | 10 |
| I.3.2. Microzonificación sísmica | 11 |
| I.4. Factores que intervienen en el movimiento del suelo y métodos para su evaluación..... | 13 |
| I.4.1. Fuente sísmica..... | 14 |
| I.4.2. Propagación de las ondas sísmicas..... | 14 |
| I.4.3. Respuesta sísmica en el emplazamiento | 15 |
| I.5. Cálculo del incremento de la intensidad sísmica | 17 |
| I.6 Conclusiones del capítulo..... | 19 |
| Capítulo II. Características físico-geográficas y geológicas del área de estudio..... | 21 |
| II.1. Condiciones físico geográficas del área de estudio | 21 |
| II.1.1. Situación geográfica | 21 |
| II.1.2. Clima..... | 22 |
| II.1.3. Relieve | 23 |
| II.1.4. Hidrología | 24 |
| II.1.5. Componentes socioeconómicos | 25 |
| II.2. Principales rasgos geológicos de la región | 26 |
| II.2.1 Historia de las investigaciones anteriores | 26 |
| II.2.2. Geología del área | 27 |
| II.2.3. Estratigrafía..... | 29 |
| II.2.4. Tectónica..... | 32 |
| II.3. Sísmicidad de la región de estudio..... | 36 |
| II. 4. Conclusiones del capítulo | 37 |
| Capítulo III. Materiales y métodos utilizados..... | 39 |
| III.1. Caracterización de la información empleada..... | 39 |
| III.1.1. Esquema ingeniero geológico 1:25 000 | 39 |
| III.1.2. Niveles de aparición de agua en los depósitos cuaternarios..... | 42 |
| III.2. Métodos empleados para determinar la respuesta del suelo..... | 44 |

| | |
|---|-----------|
| III.2.1. Analogías ingeniero geológicas..... | 44 |
| III.2.2. Rigidez sísmica..... | 44 |
| III.2.3. Zonación de la respuesta sísmica de los suelos en función del coeficiente de amplificación del terreno..... | 47 |
| III.3. Conclusiones del capítulo | 48 |
| Capítulo IV. Resultados obtenidos..... | 49 |
| IV.1. Zonación del incremento de la intensidad sísmica respecto a la roca granítica. Método de analogías ingeniero geológicas..... | 49 |
| IV.2. Zonación del incremento de la intensidad sísmica respecto a la roca granítica. Método de rigidez sísmica..... | 52 |
| IV.3. Zonación de la respuesta sísmica de los suelos en función del coeficiente de amplificación del terreno. | 56 |
| IV.4. Relación espacial entre la infraestructura socioeconómica y la peligrosidad sísmica local | 59 |
| CONCLUSIONES | 62 |
| RECOMENDACIONES | 63 |
| REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 64 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura I.1. Cantidad de sismos reportados desde el año 1500 al 2007..... | 6 |
| (Fuente: Centro Nacional de Investigaciones Sismológicas, Cuba)..... | 6 |
| Figura I.2. Ubicación del epicentro del terremoto del 10 de octubre de 2003 en la región occidental de Cuba. | 6 |
| Figura I.3. Distribución de intensidades reportadas en la ciudad de Santiago de Cuba y sus alrededores en el terremoto del 13 de octubre del 2003 (Chuy y Zapata, 2005)..... | 7 |
| Figura I.4. Epicentro del sismo del 14 de diciembre del 2004 en la Islas Caimán..... | 7 |
| Figura I.5. Muestra de los huecos producidos por el sismo del 14 de diciembre del 2004 en las playas de George Town. | 8 |
| Figura I.6. Zonas sismogénicas en la República de Cuba (según Chuy, 2002)..... | 10 |
| (2: Norte Cubana Occidental, 6: Pinar I. 5: Consolación del Norte. 10: Río Hondo) | 10 |
| Figura II.1. Ubicación geográfica del área de estudio. | 21 |
| Figura II.2. Mapa de curvas de nivel. | 24 |
| Figura II.3. Imagen Google Earth del pueblo de San Cristóbal y áreas aledañas. | 25 |
| Figura II.4. Mapa geológico de la zona de estudio. Confeccionado por el Instituto de Geología y Paleontología de Cuba en el año 2008. Escala original 1:50 000. | 29 |
| Figura II.5. Mapa de la estructura en bloques de Cuba en el Terciario Superior (bloques neotectónicos). Simplificada de Iturralde-Vinent (1978, 1998). | 34 |
| Figura II.6. Caracterización de la amenaza sísmica en la República de Cuba (Chuy, 2002)..... | 37 |
| Figura III.1. Obtención de una capa equivalente (Masuda et al, 1979)..... | 46 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|--|----|
| Tabla I.1. Velocidades de los movimientos verticales en Cuba determinadas según métodos geodésicos de nivelaciones reiteradas (Liliemberg, 1984). | 5 |
| Tabla I.2. Incremento de la intensidad macrosísmica en función de la geología. | 18 |
| Tabla I.3. Incremento de la intensidad macrosísmica en función de la edad de los materiales, propuestos por diversos autores a partir de los datos recogidos en el sismo de San Francisco de 1906..... | 18 |
| Tabla II.1. Clasificación altimétrica del relieve en pisos altitudinales y categorías. (Según Díaz et al., 1986) | 23 |
| Tabla III.1. Perforaciones en el área de estudio con niveles de aparición de agua. | 43 |
| Tabla IV.1. Velocidad de las ondas sísmicas transversales, para cada uno de los complejos ingeniero geológicos definidos en el pueblo de San Cristóbal y áreas aledañas. | 53 |
| Tabla IV.2. Correlación entre los valores de velocidades transversales propuestos por Lomtadze (1977) y los determinados para los diferentes complejos ingeniero geológicos en el pueblo de San Cristóbal y áreas aledañas. | 53 |
| Tabla IV.3. Tabla para determinar la velocidad equivalente de cada uno de los cortes ingeniero geológicos por el método de Masuda et al. (1979). | 54 |
| Tabla IV.4. Hoja de cálculo para determinar ΔI por el método de rigidez sísmica..... | 54 |
| Tabla IV.5. Comparación entre los ΔI obtenidos por el método de analogías ingeniero geológicas (método cualitativo) y el método de rigidez acústica (método cuantitativo). | 55 |
| Tabla IV.2. Niveles de peligrosidad sísmica para el pueblo de San Cristóbal y áreas aledañas. | 59 |

ÍNDICE DE ANEXOS

| | |
|---|----|
| Anexo I. Terremotos fuertes reportados en Cuba..... | 71 |
| Anexo II. Mapa con el grado de estudio. Pueblo de San Cristóbal y áreas aledañas, Cuba. Escala original 1:25 000..... | 72 |
| Anexo III. Esquema ingeniero geológico. Pueblo de San Cristóbal y áreas aledañas, Cuba. Escala original 1:25 000..... | 73 |
| Anexo IV. Rangos de variación de los índices físico-mecánicos de los depósitos de cobertura..... | 74 |
| Anexo V. Método de categorías por perfiles geológicos típicos (Popov, 1959)..... | 75 |
| Anexo VI. Clasificación de los suelos según su comportamiento sísmico. Comparación de las normas NC 46: 1999 y NCSE-02 (Elaboración propia). | 77 |
| Anexo VII. Mapa de incremento de la intensidad sísmica respecto a la roca granítica. Obtenido por el método de analogías ingeniero geológicas. San Cristóbal, Cuba. Escala original 1:25 000..... | 78 |
| Anexo VIII. Mapa de incremento de la intensidad sísmica respecto a la roca granítica. Obtenido por el método de rigidez acústica. San Cristóbal, Cuba. Escala original 1:25000..... | 78 |
| Anexo IX. Mapa del comportamiento del coeficiente de amplificación del terreno C. San Cristóbal, Cuba. Escala original 1:25 000. | 79 |
| Anexo X. Mapa con la relación espacial entre la infraestructura socioeconómica y la peligrosidad sísmica local. San Cristóbal, Cuba. Escala original 1:25 000..... | 80 |

INTRODUCCIÓN

La microzonificación o microzonación sísmica (MS) es un método empleado en la evaluación de la peligrosidad sísmica en zonas urbanas. Consiste en la identificación y caracterización de unidades litológicas, generalmente suelos, cuyas respuestas dinámicas frente a terremotos son semejantes. Además de estas unidades, se incluyen los efectos inducidos (fallas, licuefacción, etc.) y se valora su peligrosidad. Los mapas resultantes o mapas de microzonación sísmica se presentan en una base cartográfica útil para fines de edificación y planificación urbana. Las escalas utilizadas suelen estar comprendidas entre 1:25000 y 1:5000, aunque pueden variar en función del grado de detalle requerido e información disponible (González de Vallejo, 2002).

Durante los últimos decenios la comunidad internacional ha sentido una alarma creciente ante desastres que, por afectar a concentraciones cada vez mayores de población, tienden a ser consecuentemente más destructivos. Aunque la respuesta de esta comunidad ha estado fundamentalmente orientada hacia medidas de ayuda, se ha llegado a la conclusión de que las consecuencias reales y potenciales de los desastres están adquiriendo tal gravedad y alcance, que en lo sucesivo se debe prestar más atención a las actividades de planificación, prevención y mitigación. Esto es porque los efectos de los fenómenos naturales deben analizarse no solo desde el punto de vista humanitario y social en general, sino también desde el punto de vista científico.

De los desastres naturales tienen una connotación especial los terremotos, como uno de los azotes más terribles para la vida del hombre y sus bienes. La rapidez de su aparición, sin que nada prácticamente indique su inminencia, el ruido que los acompaña, la violencia de las sacudidas que en unos segundos transforman una ciudad próspera en un montón de ruinas, así como los efectos secundarios que producen en el terreno, tales como hundimientos, deslizamientos de laderas, cambios en el régimen de las aguas subterráneas, constituyen para el hombre otros tantos factores de temor y de impotencia. Los terremotos, sismos o temblores de tierra, originados por la liberación súbita de la energía acumulada durante los procesos de deformación de la corteza terrestre, no constituyen eventos desconocidos en Cuba. Sin embargo, a pesar de que existe una adecuada información acerca de las causas y consecuencias de estos fenómenos naturales, muchas veces ese conocimiento no ha sido trasladado claramente a la población de muchas regiones del país, para que el ciudadano común tome las medidas

de precaución necesarias, y no sea sorprendido sin defensa alguna cuando ocurran estos fenómenos.

La zonación sísmica (ZS) de las áreas urbanas ofrece la posibilidad de reducir la vulnerabilidad frente a eventos sísmicos, mediante la delimitación de zonas con diferentes niveles de intensidad o aceleración del terreno y elevada susceptibilidad a los fenómenos físico-geológicos inducidos. Estas investigaciones proporcionan una base óptima para las evaluaciones detalladas del nivel de vulnerabilidad sísmica de las estructuras, creando las condiciones necesarias para la adopción de medidas de protección contra terremotos y la reducción del riesgo sísmico. Los mapas de ZS aportan también los parámetros y criterios necesarios para una planificación urbana racional y un diseño arquitectónico-estructural adecuado.

La tesis presenta los resultados del análisis detallado de las condiciones ingeniero geológicas como base para la identificación de los potenciales escenarios de peligro sísmico en el pueblo de San Cristóbal y áreas aledañas.

La provincia de Pinar del Río se encuentra ubicada en una zona de sismicidad baja; no obstante, en el territorio provincial se han reportado 32 sismos perceptibles hasta el año 2008 (anexo I). El más destructor ocurrió el 22 de enero de 1880 a las 23:10 hora local y afectó fundamentalmente la zona de San Cristóbal-Candelaria, con una intensidad sísmica de 8 grados MSK y una magnitud de 5.9 en la escala de Richter, ocasionando pérdidas materiales de consideración. Otros sismos importantes se reportan por Chuy (1999) en 1957 en la ciudad de Pinar del Río y en 1981 en la zona de Alonso de Rojas, ambos de intensidad 5.0 MSK. El 10 de octubre de 2003 fue registrado por todas las estaciones cubanas un terremoto de magnitud 4.4 Richter, con epicentro en el mar al norte de la provincia de Pinar del Río, y que tuvo la particularidad de ser el más energético señalado en Cuba occidental en un período largo de tiempo.

Ordaz et al. (2009) elaboraron el esquema ingeniero geológico para el pueblo de San Cristóbal y áreas aledañas, donde se definieron 4 complejos ingeniero geológicos, cada uno con características geotécnicas, espesores y condiciones hidrogeológicas particulares, los que deben poseer, por tanto, respuestas diferentes ante un sismo.

La investigación toma especial importancia considerando el gran desarrollo de la infraestructura económica, social y para la defensa militar en San Cristóbal. Por otra parte, hasta el momento en la provincia de Pinar del Río no se han realizado trabajos de zonación sísmica de carácter territorial, limitándose estos a obras puntuales de especial importancia por su magnitud y complejidad.

Por los elementos expuestos, se decide realizar la presente investigación sobre la incidencia de las condiciones ingeniero geológicas en la zonación sísmica para el pueblo de San Cristóbal y áreas aledañas; proponiendo el siguiente diseño de investigación:

- **Problema**

Se desconoce la respuesta del macizo geológico frente a la actividad sísmica.

- **Objeto de estudio**

Condiciones ingeniero geológicas del macizo geológico.

- **Objetivo general**

Determinar la influencia de las condiciones ingeniero geológicas en la respuesta sísmica local.

- **Objetivos específicos**

1. Definir el estado actual de la temática a partir de las experiencias en Cuba y otros países.
2. Caracterizar las particularidades geológicas del territorio y su relación con la sismicidad regional.
3. Estimar los efectos de amplificación del suelo en términos de la intensidad a partir de la información ingeniero-geológica disponible.
4. Aplicar la metodología propuesta en el área de estudio, resaltando su importancia en el manejo del peligro sísmico.

- **Hipótesis**

Si se caracteriza geotécnicamente el macizo geológico se podrán determinar las áreas de mayor incremento de intensidad sísmica, con la consiguiente reducción de las pérdidas asociadas con el peligro sísmico.

- **Resultados esperados**

1. Análisis de la experiencia actual en Cuba y otros países de la aplicación de métodos cualitativos en la microzonificación sísmica.
2. Actualización sobre las condiciones sismológicas regionales del territorio.
3. Propuesta metodológica de microzonificación sísmica a partir de datos ingeniero-geológicos para aplicar en casos similares.
4. Mapa con los incrementos de intensidad sísmica para cada complejo ingeniero geológico mapeado en el área.

Capítulo I. Marco teórico-referencial

En el capítulo se presenta una revisión de los fundamentos teóricos que sustentan la temática de investigación. Se inicia con una breve exposición de las características generales de la sismicidad de Cuba y de la provincia de Pinar del Río, así como una reseña sobre el desarrollo de los estudios de zonificación y microzonificación sísmica en el país, incluyendo los realizados en objetivos de gran importancia económica o social. Contiene, además, una referencia a los principales factores y procesos que intervienen en los efectos sísmicos del suelo, como base para la determinación de los métodos de cálculo del incremento de la intensidad sísmica a partir de los datos ingeniero-geológicos del territorio.

I.1. Características generales de la sismicidad y el peligro sísmico en Cuba

En Cuba se definen dos tipos de sismicidad, explicado a través de su posición geográfica respecto a las placas tectónicas del Caribe y Norteamericana. El primer tipo se relaciona con el *contacto entre placas* en la porción suroriental de Cuba, donde la fuente fundamental de los sismos en esta zona es la falla Oriente, principal zona sismogénica de Cuba. La actividad sísmica tiene una mayor frecuencia y magnitud en relación con el resto de la isla ($M > 7.0$).

El segundo tipo de sismicidad se denomina de *interior de placas* que incluye al resto del archipiélago con una sismicidad relativamente baja, que se caracteriza por la manifestación de períodos de mayor actividad que alternan con otros de relativa calma. Los terremotos reportados en la zona de interior de placas no han sobrepasado la magnitud $M=6.2$. Los mismos están relacionados con la actividad de fallas regionales, principalmente en las zonas occidental y central de Cuba (González, 2006).

La actividad sísmica de la provincia de Pinar del Río se caracteriza por una baja ocurrencia de eventos sísmicos, que se asocian, en su mayoría, a estructuras geológicas disyuntivas que han manifestado actividad en las etapas más recientes de la evolución geólogo-tectónica del territorio. Sin lugar a dudas, el sismo más importante fue el del 23 de enero de 1880 en la región San Cristóbal-Candelaria, el cual alcanzó una magnitud de 5.9 y una intensidad MSK de 8 grados, y que fue sentido en zonas tan diferentes como Cienfuegos y Cayo Hueso. Está considerado entre los terremotos fuertes reportados en Cuba. Este terremoto se asocia a la zona sismogénica Pinar I, la más importante de las dos en que se ha subdividido la falla Pinar, siendo $M_{\text{máx}} = 6.25$ la

magnitud del terremoto máximo potencial que puede generar esta zona. En el anexo1 se relaciona una serie de terremotos perceptibles entre los años 1528 y 1990 en la porción centro oriental de la provincia de Pinar del Río.

Iturralde-Vinent (2003) describe la ocurrencia de movimientos oscilatorios del terreno en Cuba. En este sentido, las investigaciones geodésicas de nivelaciones sucesivas realizadas en décadas pasadas ofrecen una idea de la velocidad de los movimientos del terreno en Cuba. Por este método se han determinado valores extremos de 12-15 mm/año en Cuba oriental, y velocidades entre los 1 y 4 mm/año para el resto de la Isla (tabla I.1). Esto demuestra que el occidente cubano también está activo y susceptible a la ocurrencia de sismos (figura I.1).

Tabla I.1. Velocidades de los movimientos verticales en Cuba determinadas según métodos geodésicos de nivelaciones reiteradas (Liliemberg, 1984).

| Localidad | Velocidad, mm/a |
|-------------------------------|------------------------|
| Sierra de los Órganos | 0.5 |
| Alturas La Habana-Matanzas | 0.5-0.8 |
| Lomas de Santa Clara | 1.0-3.0 |
| Alturas de Minas Altagracia | 0.5-2.0 |
| Llanura sur de Pinar del Río | 2.0-4.0 |
| Llanura sur de La Habana | 0.5-2.0 |
| Llanura norte de Las Villas | 2.0-3.0 |
| Depresión del Cauto | 7.0-8.0 |
| Depresión de Santiago de Cuba | 1.0-3.0 |
| Sierra Maestra oriental | 12.0-15.0 |
| Sierra Maestra occidental | 1.0-3.0 |

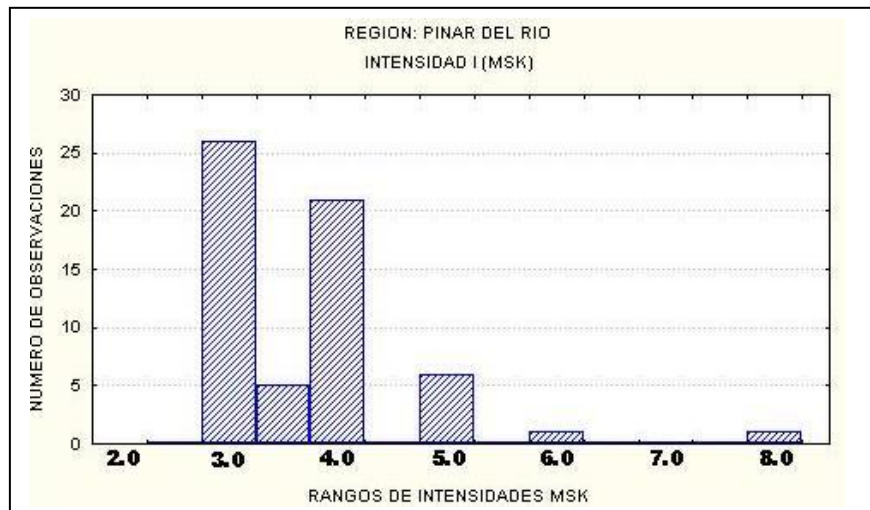


Figura I.1. Cantidad de sismos reportados desde el año 1500 al 2007.
(Fuente: Centro Nacional de Investigaciones Sismológicas, Cuba)

I.2. Terremotos significativos recientes reportados en Cuba

Los sismos que más significación han tenido para el archipiélago cubano en este último decenio han sido tres, dos en el 2003 y uno a finales del 2004. El terremoto del 10 de octubre de 2003, registrado por todas las estaciones del territorio nacional, tuvo la particularidad de ser el más energético en esa región en un período largo de tiempo (magnitud 4.4 Richter) y, a pesar de no haberse reportado perceptible en ningún punto poblado por la distancia a que se encontraba el epicentro de la parte noroeste de la provincia de Pinar del Río (figura I.2), no deja dudas de la potencialidad que siempre se ha indicado al territorio occidental de Cuba.

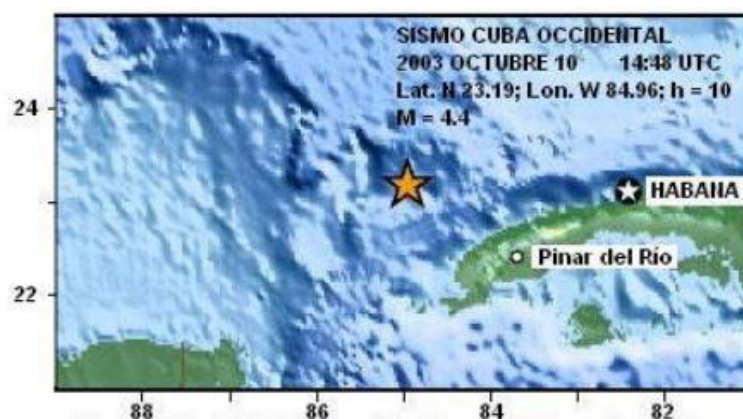


Figura I.2. Ubicación del epicentro del terremoto del 10 de octubre de 2003 en la región occidental de Cuba.

Días más tarde, el 13 de octubre, se registró también por todas las estaciones cubanas un terremoto de magnitud 4.5 Richter al sur de la provincia de Santiago de Cuba, que

produjo afectaciones en algunas edificaciones de la ciudad de Santiago de Cuba (Chuy y Zapata, 2005).

Este sismo, evaluado en 6.0 grados de intensidad MSK, fue perceptible en prácticamente toda la región oriental. Sus parámetros principales se indican en la figura I.3, en la que se muestra la distribución de intensidades MSK sentidas en la ciudad de Santiago de Cuba y sus alrededores.

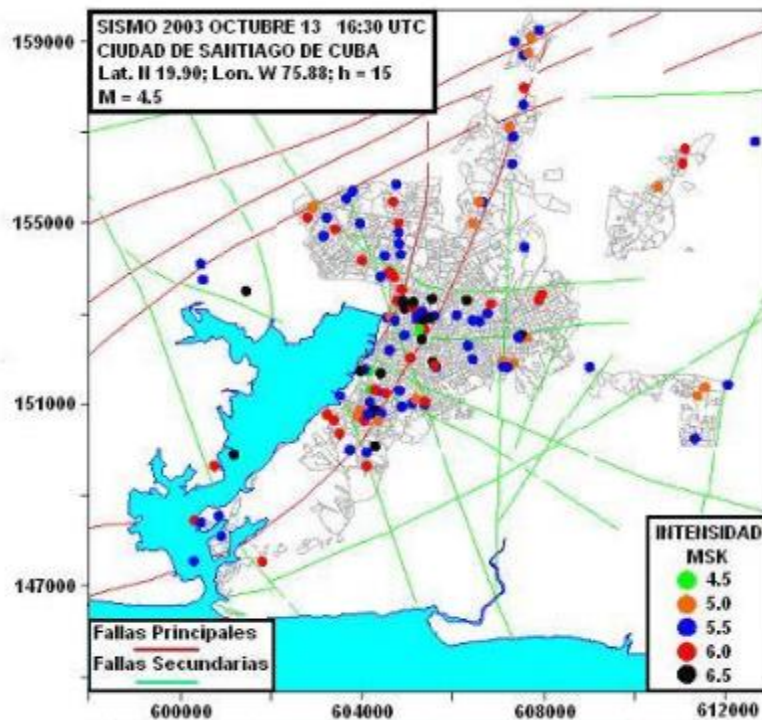


Figura I.3. Distribución de intensidades reportadas en la ciudad de Santiago de Cuba y sus alrededores en el terremoto del 13 de octubre del 2003 (Chuy y Zapata, 2005).

Chuy y Zapata (2005) consideran como el tercer sismo más significativo para nuestro territorio en el referido período, el que ocurrió el 14 de diciembre de 2004 y tuvo su epicentro en el área de las Islas Caimán (figura I.4).

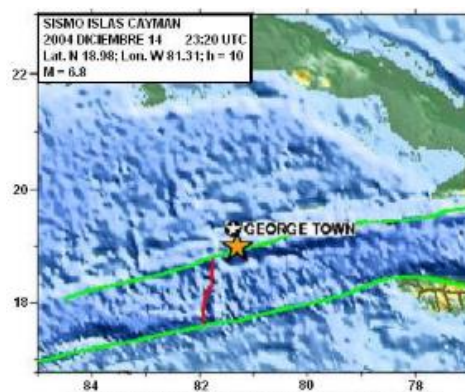


Figura I.4. Epicentro del sismo del 14 de diciembre del 2004 en las Islas Caimán.

Este sismo, evaluado en 6.0 grados de intensidad MSK, produjo agujeros en las arenas de las playas públicas de George Town, entre otras afectaciones (figura I.5).

El epicentro del sismo de Islas Caimán, a pesar de encontrarse distante del archipiélago cubano, se reportó perceptible en prácticamente todo el territorio nacional, con intensidades entre 3.0 y 5.0 grados MSK. Son de significar los efectos producidos en las ciudades de Pinar del Río, Santa Clara y Sancti Spíritus, al igual que en la vecina isla de Jamaica (Kingston) y México (Cancún) (Chuy y Zapata, 2005).



Figura I.5. Muestra de los huecos producidos por el sismo del 14 de diciembre del 2004 en las playas de George Town.

I.3. Surgimiento, desarrollo y estudios de la zonificación sísmica en Cuba

El primer mapa de zonificación sísmica en Cuba se confeccionó a finales de la década de los años 60. Como información básica, se utilizaron datos de terremotos perceptibles y fuertes ocurridos en el territorio nacional provenientes, en su mayoría, de fuentes históricas. Este mapa fue publicado en 1970 en el Atlas Nacional de Cuba con la denominación de «Mapa de Intensidades Sísmicas de Cuba».

Entre 1980 y 1983 se confeccionó un nuevo mapa en el que se incluyeron datos adicionales de terremotos perceptibles y fuertes ocurridos en el país, así como la información geológica y tectónica existente. Se debe señalar que, para la obtención de estos primeros mapas, no fueron delimitadas zonas sismogénicas, ni se realizaron estimados cuantitativos del peligro sísmico. La información geológica y tectónica se utilizó solo como auxiliar para la delimitación de las fronteras de las zonas de diferentes intensidades que se corresponden con las máximas observadas (González, 2006).

Específicamente, el mapa preparado por Chuy et al. (1983) sirvió como documento básico para la norma cubana de construcción en zonas sísmicas publicada en 1985. Esta

norma fue preparada en función de la intensidad macrosísmica expresada en la escala de intensidades MSK.

Una segunda generación de mapas de peligro sísmico del territorio nacional comenzó a ser elaborada a finales de la década de los ochenta. Para el cálculo de los estimados del peligro se utilizaron diferentes algoritmos basados en el enfoque probabilístico zonificado. Como resultado, se obtuvieron mapas de intensidades para períodos de recurrencia de 100 y 1000 años, y de probabilidades de no excedencia de ciertos valores de intensidad de los movimientos del terreno para tiempos de exposición de 20 y 50 años. Estos mapas se publicaron en 1989 en el Nuevo Atlas Nacional de Cuba.

En 1995 se confeccionó una nueva versión del mapa de zonificación sísmica del territorio nacional, expresado en términos de la aceleración pico horizontal del movimiento del terreno (Chuy y Álvarez, 1995). Este mapa sirvió de base al nuevo documento normativo para la construcción en zonas sísmicas, publicado en 1999 y actualmente vigente en Cuba (NC-46:1999). Como puede apreciarse, es a partir de 1995 que se introduce la aceleración como parámetro para la medición del efecto sísmico.

En el 2002 se iniciaron nuevas investigaciones para la obtención de una tercera generación de estimados probabilísticos del peligro sísmico, con el error asociado (García et al., 2003). Para ello se utilizaron métodos probabilísticos zonificados y no zonificados y el procedimiento del árbol lógico de decisión. Actualmente se cuenta con diferentes variantes de mapas de peligro para el territorio nacional, donde el parámetro que mide la severidad del movimiento del terreno es la aceleración. Como puede apreciarse, todo lo expuesto guarda una total coherencia con la política mantenida por Cuba para las investigaciones sismológicas, que ha sido altamente influenciada en un principio por la escuela sismológica de la antigua Unión Soviética.

Por el interés que reviste para Cuba el riesgo sísmico para la segunda ciudad en importancia, en paralelo con los estudios regionales se realizaron estudios específicos con el objetivo de precisar el peligro sísmico a que está sometido Santiago de Cuba (Álvarez, 1983; González y Kogan, 1987). Como resultado de dichos estudios, se obtuvo un nivel básico de intensidad (o grado base) de 8 grados. Este valor de intensidad fue adoptado para los estudios de microzonificación sísmica de este territorio urbano. Una detallada descripción de los suelos, que en algunas partes de este trabajo se trata de forma muy general, y que ha constituido parte esencial del mismo, aparece en varias referencias (González et al., 1984, 1989; González, 1991; Zapata, 1996).

I.3.1. Zonas sismogénicas

Una zona sismogénica representa una región geográfica susceptible de generar terremotos fuertes y con alto grado de sismicidad. También se le denomina “zona principal de liberación de la energía sísmica” o “lugar de ocurrencia de los terremotos fuertes”. En Cuba han sido identificadas diferentes zonas sismogénicas (figura I.6), describiéndose seguidamente las características geólogo-geofísicas y sismológicas de las correspondientes a la parte occidental del país.

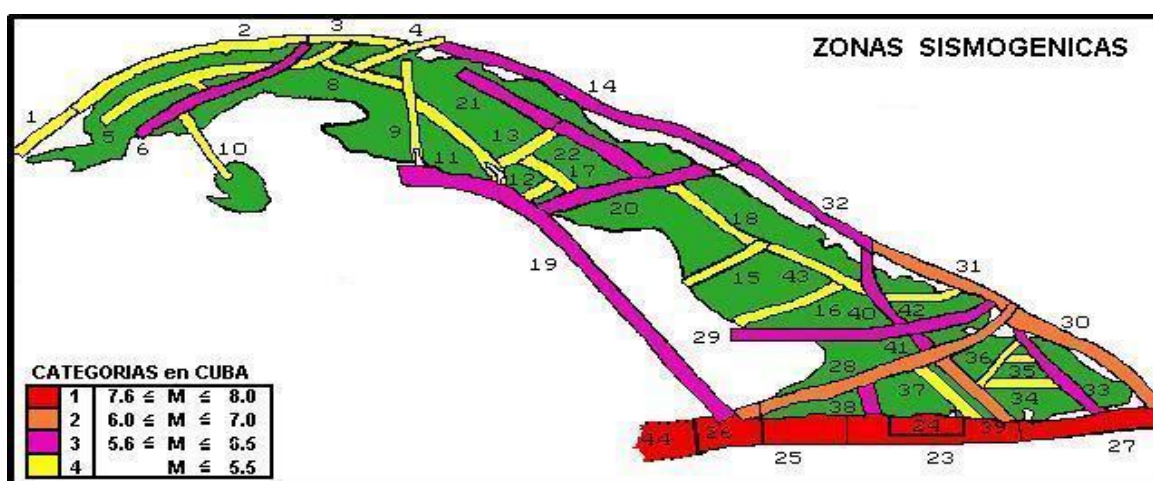


Figura I.6. Zonas sismogénicas en la República de Cuba (según Chuy, 2002).

(2: Norte Cubana Occidental, 6: Pinar I. 5: Consolación del Norte. 10: Río Hondo)

➤ Zona sismogénica Norte Cubana Occidental

Se asocia a la zona de falla Norte Cubana Occidental. Posee una extensión de 380 km, aproximadamente 4 km de ancho y aparece bordeando toda la plataforma norte cubana. Esta zona ha sido estudiada por diferentes métodos, entre ellos los sísmicos. Fue interceptada a una profundidad de 8 km por los perfiles sísmicos 80 y 70 de la expedición de barco soviético V. Obruchev, aunque por sus características geológicas y longitud debe tener mayor profundidad.

La mencionada zona de fallas se originó durante el Mioceno Superior-Plioceno Inferior y continúa siendo activa en la etapa actual; los desplazamientos a lo largo de esta falla son verticales, y la amplitud total de dichos desplazamientos supera los 1.5 km, con un valor de gradiente de los movimientos neotectónicos de 6×10^{-9} cm/año⁻¹. Sobre la base del análisis conjunto de las características geológicas, geofísicas y sismológicas, fue determinado que el terremoto máximo potencial que puede general zona posee una

magnitud $M_{\max}=5.5$, mientras que la magnitud del terremoto máximo observado es $M_{\text{obs}}=4.2$.

➤ **Zona sismogénica Pinar I**

Está asociada a la zona de falla Pinar. Posee una extensión de aproximadamente 170 km, y una dirección suroeste-noreste. Bordea una parte de la cordillera de Guaniguanico. Su ancho promedio es de 10 km, con una profundidad máxima de 25 km aproximadamente. Los movimientos más intensos de la falla ocurrieron en la Sierra del Rosario, siendo superiores a los 3 km, mientras que el gradiente de los movimientos neotectónicos alcanza un valor de 4×10^{-8} cm/año⁻¹. A esta zona de falla se asocia el terremoto de $M=5.9$, que produjo sacudidas de VIII grados de intensidad en localidades de San Cristóbal y Candelaria, así como numerosos eventos sísmicos de magnitudes inferiores. Según datos del Centro Nacional de Investigaciones Sismológicas, el terremoto máximo potencial que puede generar la zona posee una magnitud de $M_{\max}=6.25$.

➤ **Zona sismogénica Río Hondo**

Su longitud no sobrepasa en tierra los 50 km, y de acuerdo con los datos geofísicos se le estima una profundidad de 15 km. La falla a que se asocia esta zona no posee manifestaciones en el relieve y la evidencia de actividad contemporánea solo esta dada por la ocurrencia de sismos de $I=5$ ($M=4.2$). La magnitud del terremoto máximo potencial que puede generar esta zona $M_{\max}=5.0$.

➤ **Zona sismogénica Consolación del Norte**

Posee una longitud de 180 km y una profundidad de aproximadamente 20 km. La magnitud del desplazamiento de los bloques que delimitan esta estructura es de 800 m y el valor máximo del gradiente de los movimientos neotectónicos es de 2×10^{-9} cm/año⁻¹. La magnitud del terremoto máximo potencial que puede generar esta ZS es $M_{\max}=5.0$ y la $M_{\text{obs}}=4.2$.

I.3.2. Microzonificación sísmica

Es amplia la lista de estudios de microzonación sísmica (MS) realizados en Cuba (Álvarez, 1983; González et al., 1984; González et al., 1989; Zapata 1996; Chuy, 2005;

Zapata, 2005; por solo citar algunos). De forma general la mayoría se concentran en la zona oriental de la isla.

Es necesario destacar el hecho que para los trabajos de microzonificación sísmica en Santiago de Cuba fue utilizado un equipo analógico selector por frecuencias. Hoy día esta tecnología de carácter analógico ha sido superada por una de carácter digital, pero sin dudas contribuyó en su momento a darle un nivel de detalle muy alto al trabajo de microzonificación.

Sí es justo destacar que en la zona centro occidental se han realizado algunos trabajos de MS, sobre todo relacionados con obras puntuales de gran importancia económica. Estos trabajos se realizaron con el fin de seleccionar los emplazamientos de menor peligro sísmico o en su defecto adoptar medidas sismorresistentes y así reducir la vulnerabilidad de objetivos económicos que lo requerían.

Uno de estos trabajos fue el realizado por Chuy y González (1982) en el área propuesta para la construcción de la refinería de Cienfuegos. Los autores utilizaron los métodos de analogías ingeniero geológicas propuesto por Popov (1959) y el de rigidez sísmica (Medvedev, 1977), al disponer de mediciones de las velocidades de propagación de las ondas sísmicas y un volumen considerable de datos físico-mecánicos de los suelos y rocas.

El mapa de MS obtenido (Chuy y González, 1982) muestra incrementos de hasta un grado de intensidad sísmica según la escala MSK. Según los autores, el área investigada era bastante homogénea desde el punto de vista geólogo-litológico; sin embargo, la presencia de zonas de fisuramiento y fenómenos cársicos, así como la profundidad de yacencia del manto freático, determinaron la delimitación de zonas desfavorables desde el punto de vista sísmico.

En la referida provincia de Cienfuegos también se realizó la microrregionalización sísmica del área de construcción de la Central Electronuclear de Juraguá, empleando una metodología similar a la descrita.

A consideración del autor de esta tesis, uno de los trabajos más completos en el occidente de Cuba fue el realizado por González y Pérez (2005). Este trabajo tuvo como objetivo determinar los escenarios de peligro sísmico y los fenómenos geotécnicos asociados en municipios de Ciudad de La Habana. La investigación cubrió tres aspectos fundamentales:

a. Caracterización de la sismicidad, basada en información histórica e instrumental de eventos sísmicos.

b. Identificación de las zonas sismogénicas con mayor incidencia en el territorio, y la selección de escenarios potenciales para eventos sísmicos con mayor probabilidad de afectar este territorio.

c. Se realizó la microzonificación sísmica a escala urbana, delimitándose aquellas zonas donde pueden ser amplificadas las ondas recibidas de estos eventos, y producirse deformaciones geológicas residuales.

En la provincia de Pinar del Río han sido limitados los trabajos de microzonación sísmica realizados, reduciéndose a 2 investigaciones. La primera tuvo como objetivo investigar la influencia del estrato arenoso superficial y del nivel freático en el incremento del grado sísmico regional en un área de construcción de edificios para viviendas en la localidad de Sandino, extremo occidental de la provincia de Pinar del Río. El método empleado fue el de rigidez acústica, con medición de la velocidad de las ondas sísmicas longitudinales de los suelos.

Sin embargo, el estudio de mayor envergadura en la provincia fue el realizado en el área de ubicación del Complejo Polimetálico Castellanos, donde se aplicó una metodología basada en determinar el incremento total de la intensidad sísmica a partir de tres componentes: dureza sísmica, nivel freático y resonancia. Los incrementos totales obtenidos oscilaron entre -0.16 y +0.89.

I.4. Factores que intervienen en el movimiento del suelo y métodos para su evaluación

El estudio de la peligrosidad sísmica local y de la zonación sísmica implica el conocimiento de los diferentes factores que influyen en el movimiento del suelo y, por tanto, de los métodos necesarios para evaluar cada uno de estos factores, lo que resulta el contenido principal del presente epígrafe. Además, se describen los métodos de cálculo más utilizados en Cuba.

Las oscilaciones del terreno en un área determinada, derivada de la acción de un terremoto, dependen de tres factores:

- a. Ruptura que se produce en la fuente sísmica.
- b. Propagación de las ondas sísmicas.
- c. Respuesta sísmica en el emplazamiento.

I.4.1. Fuente sísmica

Uno de los aspectos básicos para el estudio y evaluación de la peligrosidad sísmica es la caracterización de las fuentes de los terremotos. La tectónica de placa explica la distribución de la sismicidad a escala global, permitiendo distinguir entre zonas sísmicamente activas, que coinciden con los límites de placas litosféricas, y zonas relativamente estables situadas en el interior de las placas. Dentro de las áreas sísmicas, las fuentes concretas de los terremotos superficiales son estructuras geológicas definidas (fallas), cuya actividad tectónica es responsable de la liberación de energía durante el terremoto.

La ubicación de los epicentros instrumentales ha permitido establecer una relación entre las fallas y los terremotos superficiales. Se han constatado alineaciones de epicentros con trazas de fallas que han tenido acción durante el Cuaternario.

Por otra parte, en las zonas “estables” (interior de placas) se han reportado terremotos de gran magnitud. Crone et al. (1992) cita un grupo de terremotos originados en áreas de baja sismicidad y que se relacionan con la reactivación de movimientos en fallas: Cutch (India, 1819), Marryat Creek (1986) y Tennant Creek (1988) en Australia, y Killari (India, 1993).

Por tanto, se considera que para una correcta evaluación de la peligrosidad sísmica se debe tener una caracterización lo más aproximada posible de la fuente.

I.4.2. Propagación de las ondas sísmicas

En su recorrido desde la fuente sísmica hasta el punto de observación, las ondas sufren alteraciones que dependen de las características del medio.

1. Medio homogéneo

En un medio homogéneo se deben considerar los efectos de la extensión geométrica y de la atenuación anelástica. La extensión geométrica es la disminución de la amplitud debida a la expansión del frente de onda. Para una fuente puntual en un medio uniforme, la extensión geométrica del frente de ondas, que para una onda interna se considera esférica, produce una disminución de la amplitud del movimiento con la distancia r a la fuente de la forma $1/r$. Para ondas superficiales, el frente de ondas se considera cilíndrico y el decrecimiento es de la forma $1/r^2$.

Según Macau (2008) la atenuación anelástica es debida a las imperfecciones de la elasticidad del medio por donde se propaga la onda. Produce una disminución adicional

de las amplitudes del tipo $e^{-\gamma r}$ donde r es la distancia a la fuente y γ es el coeficiente de inelasticidad, que está relacionado con el factor de calidad Q del siguiente modo:

$$\gamma = \pi f / Q\beta$$

donde:

f es la frecuencia de las ondas,

β es la velocidad de propagación de las ondas de cizalla,

Q es el factor de calidad que se puede considerar o no dependiente de la frecuencia.

En un medio elástico conformado por rocas consolidadas, el factor Q es muy elevado, oscilando entre 200 y 500 (Pujades, 1987). En suelos, el factor Q es inferior a 50, llegando a 10 cuando los poros están rellenos de agua.

2. Medio no homogéneo

En un medio no homogéneo, la correcta consideración de la atenuación requiere un conocimiento detallado de su constitución. La heterogeneidad del medio atravesado produce cambios de la velocidad de propagación y pérdida de energía debidos a las reflexiones y refracciones sucesivas.

En la evaluación de la peligrosidad sísmica se considera la propagación de las ondas sísmicas como una expresión analítica simplificada que relaciona un parámetro específico del movimiento del suelo con otros parámetros sismológicos, como son la magnitud del terremoto, la distancia epicentral, la profundidad del terremoto, etc. Macau, (2008) propone una expresión del tipo: $\log Y(f) = a(f) + b(f)M + c(f)\log r \pm \varepsilon$ permitiendo el ajuste a valores observados en registros acelerográficos y representar de este modo la atenuación de la energía en función de la distancia a la región en la que se han obtenido los datos.

I.4.3. Respuesta sísmica en el emplazamiento

Las condiciones locales (naturaleza de los suelos, topografía, profundidad del nivel freático, etc.) propias de cada emplazamiento pueden provocar respuestas sísmicas diferentes.

El acelerograma de un terremoto (representación gráfica de la variación de aceleración con el tiempo registrada por un acelerógrafo) permite, mediante una integración numérica, calcular la aceleración máxima para un amortiguamiento específico y un

periodo dominante. La representación de estas aceleraciones máximas en función del periodo constituye el denominado espectro de respuesta del terreno, que indica la amplificación del movimiento del terreno con respecto a la aceleración, velocidad o desplazamiento. El espectro de respuesta (ER) se utiliza para el diseño sismorresistente de estructuras, donde el ER no debe exceder al de diseño de la estructura.

González de Vallejo (2002) relaciona un grupo de factores que influyen en la modificación de la citada respuesta:

- El tipo y composición litológica de los materiales, en especial los depósitos superficiales cuyo comportamiento geotécnico corresponde al de suelos.
- El espesor de sedimentos y la profundidad del sustrato rocoso o resistente.
- Las propiedades dinámicas de los suelos.
- La profundidad del nivel freático.
- La topografía, tanto superficial como del sustrato.
- La presencia de fallas, su situación y características.

Los efectos de las condiciones locales pueden determinar la posibilidad de que se produzcan roturas superficiales por falla, licuefacción de suelos y deslizamientos, además de amplificar la señal sísmica. Según las condiciones locales, las respuestas pueden ser:

- A mayor espesor de suelos, mayor amplificación de la aceleración.
- En suelos blandos, mayores amplificaciones.
- A mayor profundidad del sustrato, mayor período de vibración.
- La presencia de un nivel freático alto y suelos blandos puede suponer un riesgo de licuefacción.
- La cercanía de una falla activa puede amplificar las aceleraciones e inducir roturas superficiales.
- El efecto topográfico (mayor altura) puede aumentar las aceleraciones.

Para la determinación de las propiedades geotécnicas y dinámicas de los suelos se remite a Pastor et al. (1983), Dowrick (2000) y González de Vallejo (2002).

Si no se cuenta con acelerogramas representativos del sector de estudio es posible estimar la respuesta sísmica a partir de métodos indirectos. Uno de estos métodos consiste en determinar los “cortes tipo” del área, incluyendo espesores, densidad aparente, granulometría, ensayo de penetración estándar (SPT), módulo de deformación

tangencial, velocidad de ondas transversales y profundidad del nivel freático. Posteriormente, se toma un acelerograma de referencia, que si no es del área, al menos se asemeje a las condiciones locales. A partir de este acelerograma se simula la respuesta del subsuelo para cada uno de los “cortes tipos definidos”.

I.5. Cálculo del incremento de la intensidad sísmica

Las oscilaciones del terreno se pueden caracterizar por medio de diferentes parámetros: intensidad macrosísmica (I_{MSK}), aceleración máxima del suelo (PGA) o aceleración espectral (SA) para distintas frecuencias. Macau (2008) propone usar para estudios de riesgo sísmico la intensidad macrosísmica como parámetro característico del movimiento del suelo. La escala macrosísmica contiene implícitamente las funciones de vulnerabilidad.

Sin embargo, el uso de la aceleración máxima del suelo u otros parámetros similares requiere de expresiones que relacionen el movimiento del suelo con el daño. Esto puede resultar difícil, particularmente con la aceleración máxima del suelo que, a menudo, ha mostrado una mala correlación con el daño.

En la literatura vinculada con la temática, se pueden diferenciar dos grupos de metodologías para el cálculo de la amplificación del movimiento de suelo en términos de intensidad macrosísmica:

- i) Las **metodologías cualitativas**, que proponen un incremento de la intensidad macrosísmica mediante el criterio de experto, en función de la geología y los efectos observados en áreas ya estudiadas.

En la tabla I.2 se ofrece el incremento de la intensidad macrosísmica en función de la geología del suelo, propuesta por diversos autores a partir de los datos obtenidos en el sismo de San Francisco del 1906.

Tabla I.2. Incremento de la intensidad macrosísmica en función de la geología.

| Clase geológica | Medvedev (1962) | Borcherdt y Gibas (1976) | Astroza y Monge (1991) |
|-------------------------------|----------------------------|-------------------------------------|-----------------------------------|
| Granito | 0 | 0 | 0 |
| Calizas, areniscas y pizarras | 0.2 – 1.3 | 0.5 – 1.1 | - |
| Margas y yesos | 0.6 – 1.4 | - | - |
| Conglomerados | 1.0 - 1.6 | - | 0.5 – 1.0 |
| Suelo arenoso | 1.2 - 1.8 | 1.6 ± 0.6 | 1.0 – 2.0 |
| Suelo arcilloso | 1.2 – 2.1 | 2.7 ± 0.6 | 2.0 – 2.5 |
| Relleno artificial | 2.3 – 3.9 | - | - |

También se han establecido relaciones entre la edad de las formaciones geológicas y el incremento de la intensidad macrosísmica (tabla I.3).

Tabla I.3. Incremento de la intensidad macrosísmica en función de la edad de los materiales, propuestos por diversos autores a partir de los datos recogidos en el sismo de San Francisco de 1906.

| Unidad geológica | Everden et al. (1981) | Toppozada et al. (1988) |
|--|----------------------------------|------------------------------------|
| Rocas plutónicas y metamórficas | 0.0 | 0.0 |
| Rocas volcánicas | 0.3 | 0.3 |
| Rocas sedimentarias paleozoicas | 0.4 | 0.4 |
| Rocas sedimentarias del Mesozoico Superior | 0.8 | 0.4 |
| Rocas sedimentarias del Cretácico-Eoceno | 1.2 | 1.2 |
| Rocas sedimentarias del Oligoceno-Mioceno | 1.5 | 1.5 |
| Rocas sedimentarias del Plio-Pleistoceno | 2.0 | 1.8 |
| Sedimentos del Holoceno | 3.0 | 2.0 |

De esta forma queda demostrado el uso de la geología en estudios de amplificación del movimiento del suelo. En este caso la escala de la zonación sísmica dependerá de la escala de los mapas geológicos, lo que pudiera constituir un inconveniente. Se recomienda para el empleo de esta metodología el uso de mapas geológicos que representen las litologías cuaternarias (mapas ingeniero geológicos), con el mayor detalle posible y a escalas superiores a 1:25 000.

- ii) Las **metodologías cuantitativas** proponen relaciones matemáticas empíricas que expresan el incremento de intensidad macrosísmica en función de diferentes parámetros geotécnicos característicos de las capas superficiales, como, por ejemplo, la velocidad de propagación de las ondas transversales o de cizalla (V_s).

Partiendo de la razón espectral entre el registro del terremoto de una estación en suelo y el registro del terremoto de una estación en roca de referencia; se puede obtener la respuesta de cada litología.

Borchert et al. (1975) proponen una ecuación (1.1) que relaciona la amplificación promedio de la componente horizontal de la aceleración (CHA) para movimientos débiles y la variación de la intensidad macrosísmica (ΔI):

$$\Delta I = 0.27 + \log (CHA) \quad (1.1)$$

Si se dispone de la velocidad de las ondas de cizalla promedio de los primeros 30 m del suelo, Borchert et al. (1991) propusieron dos expresiones (ecuaciones 1.2 y 1.3) para calcular CHA, y entonces calcular ΔI con (1.1):

$$CHA = 701/V_s \quad (\text{Movimientos débiles}) \quad (1.2)$$

$$CHA = 598/V_s \quad (\text{Movimientos fuertes}) \quad (1.3)$$

Medvedev (1965) relacionó ΔI con la densidad de los suelos y la velocidad de las ondas longitudinales (ecuación 1.4):

$$\Delta I = 1.67 \cdot \log \left(\frac{\rho_0 \cdot v_0}{\rho_s \cdot v_s} \right) + e^{-0.04h^2} \quad (1.4)$$

donde

ρ_s, v_s Densidad y velocidad de propagación de las ondas P en el granito (término de referencia),

ρ_s, v_s densidad y velocidad de propagación de las ondas P en el suelo.

h profundidad del nivel freático en metros.

I.6 Conclusiones del capítulo

- La actividad sísmica de la provincia de Pinar del Río es del tipo de interior de placas y se caracteriza por una baja ocurrencia de eventos sísmicos, que se asocian a estructuras geológicas disyuntivas activas. El sismo más importante ocurrido fue el

del 23 de enero de 1880 en la región San Cristóbal-Candelaria, el cual alcanzó una magnitud de 5.9 y una intensidad MSK de 8 grados.

- La zona sismogénica más importante de la provincia es la Pinar I, asociada a la falla Pinar, siendo $M_{\text{máx}} = 6.25$ la magnitud del terremoto máximo potencial que puede generar esta zona.
- Los trabajos de microrregionalización sísmica llevados a cabo en la provincia de Pinar del Río se han realizado en obras puntuales, empleando la metodología propuesta por el autor soviético Medvedev, la cual está basada en la obtención de la densidad y velocidad de las ondas sísmicas del suelo.

Capítulo II. Características físico-geográficas y geológicas del área de estudio

El capítulo contiene una descripción de las características físico geográficas de la región de estudio, incluyendo los principales componentes del medio socioeconómico. Seguidamente, se explican los rasgos más destacados de la geología regional, prestando especial atención a la evolución del conocimiento sobre el origen y desarrollo de la falla Pinar, principal estructura sismogeneradora de la región. Al final, se indican los datos referentes a la sismicidad regional, la cual constituye el elemento de partida para conocer el grado sísmico local.

II.1. Condiciones físico geográficas del área de estudio

II.1.1. Situación geográfica

El objeto de estudio se ubica en la porción centro oriental de la provincia de Pinar del Río, la más occidental de Cuba (fig. II.1.). El área de trabajo comprende el pueblo de San Cristóbal, cabecera del municipio de igual nombre, y áreas aledañas, ocupando una superficie de 100 km² aproximadamente. Sus límites geográficos son:

| Norte | Sur | Oeste | Este |
|-------------|--------------|----------------|-------------------|
| Falla Pinar | Canal Tronco | Río Santa Cruz | Río San Cristóbal |

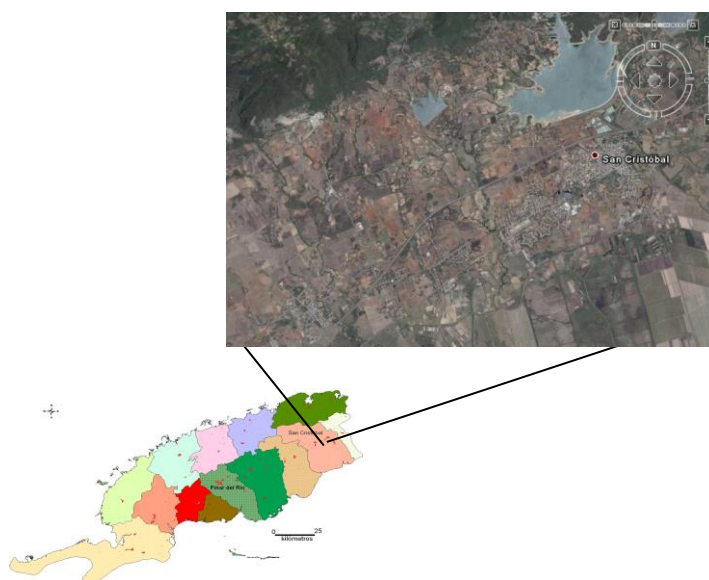


Figura II.1. Ubicación geográfica del área de estudio.

II.1.2. Clima

La región se caracteriza por un clima tropical húmedo, con algunas áreas donde se muestran características de continentalidad, tales como una gran fluctuación térmica diaria y anual, lo que ocurre especialmente a lo largo del eje medio de la Isla. La proximidad de América del Norte facilita durante el período invernal el acceso de las masas de aire frío, mientras que varios sistemas meteorológicos afectan al clima de Cuba y del territorio, como los vientos alisios, que soplan de las zonas de altas presiones oceánicas, predominando con vientos del noreste al este. Otros afectan de acuerdo con la estación del año y algunos, como los huracanes, de forma transitoria.

A continuación, se describen brevemente las principales variables climáticas que caracterizan la región de estudio, según datos del Centro Meteorológico Provincial.

➤ Régimen térmico

En la zona de estudio las temperaturas no difieren mucho de las temperaturas del resto de la provincia. Según datos de la estación meteorológica de Paso Real de San Diego, las temperaturas presentan sus mayores valores en los meses desde junio a septiembre (verano), siendo julio y agosto los más cálidos con un valor medio de 27.1°C. Esto se corrobora con el comportamiento de la temperatura máxima media, con los valores más altos en los meses de julio y agosto con 32.4°C y 32.6°C, respectivamente. En cuanto a la temperatura mínima media, esta fluctúa entre 16°C y 23°C.

➤ Régimen de vientos predominantes

La mayor parte de los vientos que inciden sobre la zona de estudio proceden del NE, como resultado de la influencia de los vientos planetarios que soplan durante todo el año, y cuyo origen se encuentra en un gradiente barométrico de presión desde la zona subtropical de altas presiones hasta la zona ecuatorial de bajas presiones.

Durante todo el año, el viento de componente NE influye directamente sobre el régimen climático de toda la zona de estudio, con una fuerza de 7.0 hasta 8.8 km/h en los meses de octubre hasta julio. Para los meses de agosto y septiembre oscila entre 5.2 y 6.2 km/h.

➤ Comportamiento de la humedad relativa

El clima de la región se considera húmedo. La humedad relativa media supera el 75% todos los meses del año; sin embargo, en el período lluvioso estos valores de humedad rebasan el 80%. Septiembre se caracteriza por ser el mes de mayor valor de humedad relativa media con 84%, mientras que abril es el de menor valor y, por ende, el más seco, con 75% de humedad relativa.

➤ Comportamiento de las precipitaciones

Esta variable meteorológica es un factor determinante en el clima de una localidad. En la zona de estudio, se definen perfectamente los dos períodos característicos del clima en Cuba, lluvioso y poco lluvioso. El período poco lluvioso corresponde a los meses desde noviembre hasta abril, donde las lluvias son producidas, sobre todo, por los frentes fríos y vaguadas prefrontales.

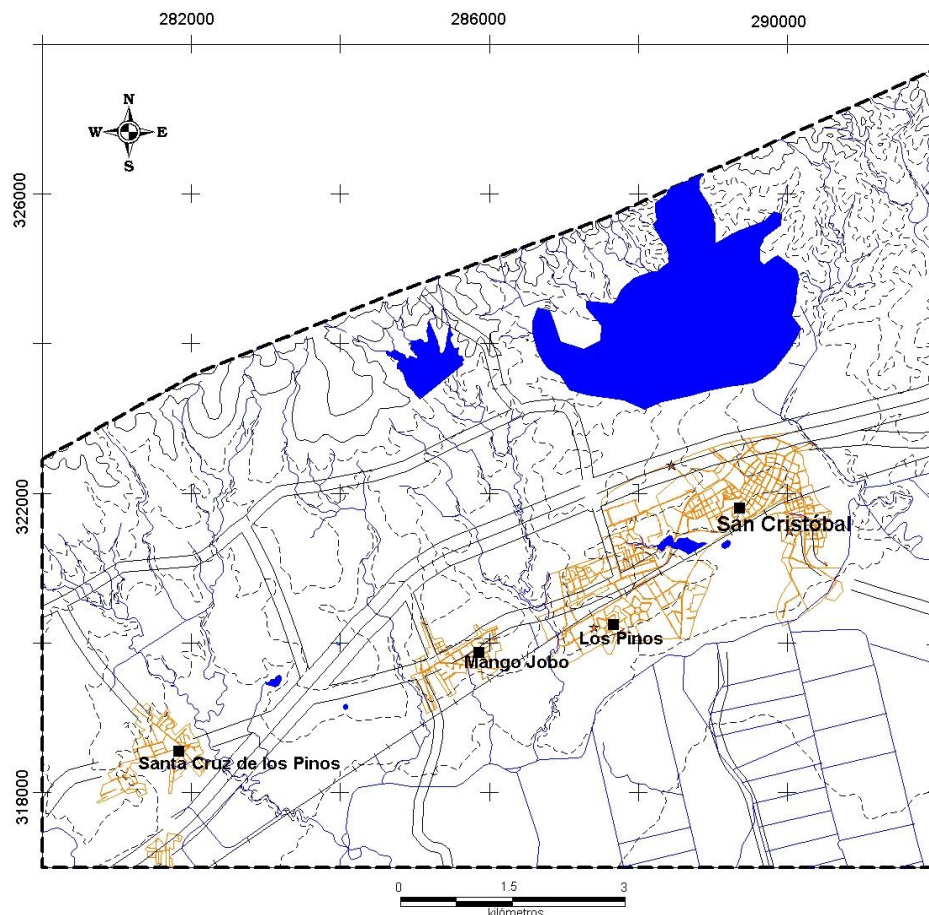
Según datos de la estación meteorológica de Paso Real de San Diego, en los últimos 10 años el mayor acumulado correspondió al mes de septiembre de 2002 con 571.5 mm y el año 2002 fue el más lluvioso con un acumulado de 1 550.3 mm.

II.1.3. Relieve

Las principales características geomorfológicas de la provincia de Pinar del Río están determinadas por la presencia de la falla Pinar, la cual divide el territorio en dos tipos de relieve bien diferenciados, al norte y sur de la misma. El área objeto de estudio se sitúa al sur de la falla Pinar, con un relieve predominantemente llano y cotas entre 30 y 120 m. Según la clasificación altimétrica del relieve, en pisos altitudinales y categorías, contenida en Díaz et al. (1986), el área clasifica en llanuras medias y llanuras altas (tabla II.1 y figura II.2).

Tabla II.1. Clasificación altimétrica del relieve en pisos altitudinales y categorías. (Según Díaz et al., 1986)

| Categoría del relieve | Piso altitudinal | |
|-----------------------|------------------|-----------------|
| | Rango, m | Nomenclatura |
| Llanuras | 120 – 80 | Llanuras altas |
| | 80 – 20 | Llanuras medias |
| | Menores de 20 | Llanuras bajas |



LEYENDA

- Curvas de nivel entre 30 y 80 m sobre el NMM (llanuras medias)
- - - Curvas de nivel entre 80 y 120 m sobre el NMM (llanuras altas)
- Embalses

Figura II.2. Mapa de curvas de nivel.

II.1.4. Hidrología

La red hidrológica de la provincia de Pinar del Río es, fundamentalmente, dendrítica, tanto hacia el litoral norte como al sur, existiendo dos cuencas hidrológicas principales, la norte y la sur, limitadas por un parteaguas natural, representado por la Cordillera de Guaniguanico.

En el sector de estudio la principal corriente fluvial corresponde al río San Cristóbal, formado por la unión de los ríos Caja de Agua y Pedrales, el cual fue represado desde la década de los 70 del pasado siglo a 1 500 m al norte del pueblo de San Cristóbal, formando el embalse conocido como La Paila, utilizado en la agricultura de la zona sur del municipio mediante una amplia red de canales de distribución. Este río está

caracterizado por sucesiones de perfiles longitudinales aplanados y abruptos, con cauces generalmente profundos y orillas semibarrancosas.

En el territorio, además de las corrientes fluviales, existen algunas lagunas y embalses, que influyen en las condiciones ingeniero geológicas del área. Al sureste de San Cristóbal se encuentra la laguna del Maní, la cual esta dividida por la carretera Central (figuras II.2 y II.3).

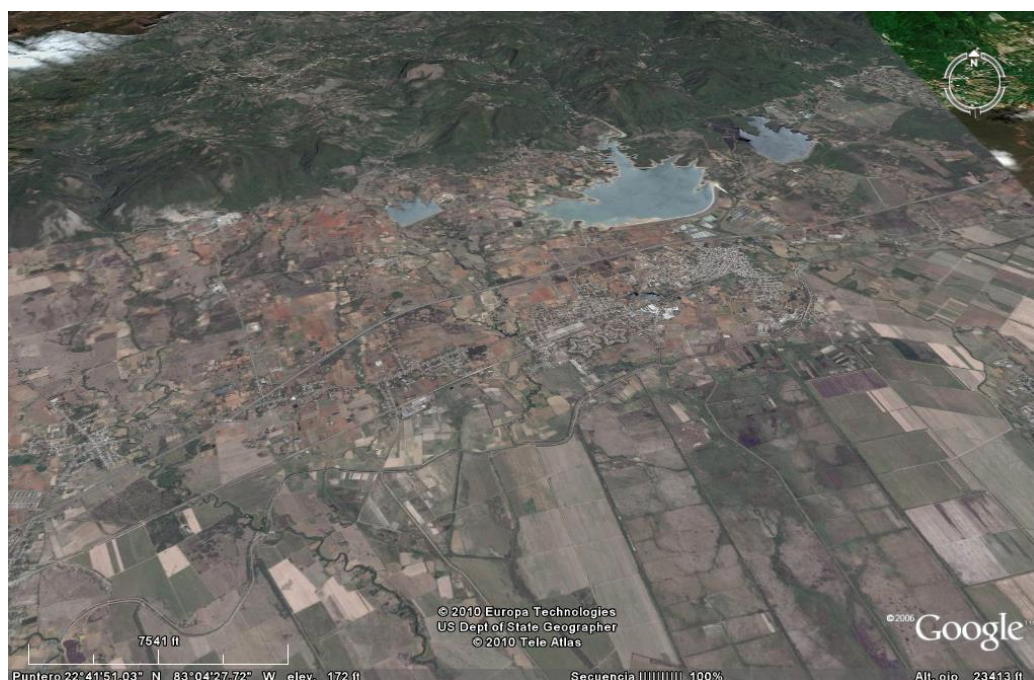


Figura II.3. Imagen Google Earth del pueblo de San Cristóbal y áreas aledañas.

II.1.5. Componentes socioeconómicos

➤ Población

El área pertenece administrativamente al municipio de San Cristóbal, segundo en importancia de la provincia. Cuenta con una población total de 70 040 habitantes, de los cuales 35 840 son hombres y 34 200 mujeres, según datos de la Dirección Provincial de Planificación Física del año 2009. Por su parte, la población de la zona urbana de San Cristóbal es de 25 291 habitantes, de ellos 12 718 hombres y 12 573 mujeres, según la misma fuente.

➤ Desarrollo socioeconómico

La economía está basada, fundamentalmente, en la agricultura. En la parte sur, el cultivo principal es la caña de azúcar, con la existencia de 2 centrales azucareros: 30 de

Noviembre y José Martí. Otro renglón económico importante es el cultivo del arroz con la existencia del CAI arrocero de Los Palacios.

A ambos lados de la Autopista Nacional, se desarrolla la ganadería. En la parte norte, donde predomina el relieve montañoso, los principales reglones económicos son la actividad forestal y el café. En el embalse La Paila existe un centro de alevinaje con la finalidad del desarrollo de la apicultura en la provincia. Relacionado con el desarrollo minero de la región es necesario mencionar la explotación de una cantera para áridos de construcción.

El municipio tiene una amplia representación en el área de los servicios de salud. Cuenta con un hospital general y un policlínico docente, ambos en el casco urbano de la capital municipal, además de varios consultorios del Médico de la Familia, llegando estos a encontrarse también hasta en las zonas más intrincadas de la geografía del municipio.

En el sector de la educación, la población cuenta con 3 círculos infantiles, 9 escuelas de enseñanza primaria y 4 de enseñanza secundaria, distribuidas por toda la parte urbana del municipio, y un número elevado de iguales enseñanzas por el territorio perteneciente al Plan Turquino-Manatí. La enseñanza preuniversitaria está representada por 2 IPUEC, mientras que se consolida la enseñanza superior en la Sede Universitaria Municipal.

II.2. Principales rasgos geológicos de la región

II.2.1 Historia de las investigaciones anteriores

La historia de los trabajos geológicos en la provincia de Pinar del Río se remonta al mismo comienzo del siglo XX (1901), cuando un grupo de geólogos norteamericanos (C. H. W. Hayes, T. W. Vaughan y A. C. Spencer) elaboraron un esquema de las estructuras geológicas, donde se incluía Pinar del Río.

Entre 1908 y 1910 se confirman los fósiles del Jurásico en Pinar del Río y entre 1910 y 1920 se dan importantes pasos en la construcción de un esquema estratigráfico de la Cordillera de Guaniguanico. Para 1932 aparecen por primera vez referencias a las calizas de la actual Formación Artemisa por Lewis (1932), quien las denominó "Artemisa limestone". Vermont para el año 1937 fue el primer autor en sugerir la tectónica de sobrecorrimientos para la Cordillera de Guaniguanico.

En el informe "Geología de Pinar del Río" de Truitt y Bronnimann (1956), el interés era la descripción y separación de las formaciones San Cayetano, Jagua, Viñales, Artemisa y otras. Teniendo en cuenta el análisis estructurofacial de la región,

determinaron cuatro cinturones faciales con sus cortes característicos: Órganos, Rosario, Cacarajícara y Bahía Honda.

Entre las investigaciones geológicas más interesantes argumentadas en este período, se encuentra el trabajo realizado por Hatten (1957) para la parte septentrional de la provincia. El elaboró un esquema estratigráfico y un mapa geológico a escala 1:40 000 que, debido a su calidad, mantiene todavía actualidad. Su columna es un resumen desde el Jurásico hasta el Paleoceno, donde se incluyen las formaciones San Cayetano, Ancón, Manacas Vieja, Wild Flysh y otras.

Después del triunfo de la Revolución, entre los años 1970 y 1975, se hizo por primera vez el levantamiento de toda la provincia por un grupo de investigadores de la Academia de Ciencias de Polonia, bajo la dirección de A. Pszczolkowski, a escala 1:250 000, y como resultado de estos trabajos se confeccionó el mapa geológico de la provincia a igual escala, esquema tectónico y columnas estratigráficas. Este trabajo constituye una obra de obligatoria consulta para trabajos presentes y futuros.

Las principales investigaciones ingeniero geológicas en el área de estudio fueron dirigidas al Vial Central de Montaña, Vial San Cristóbal-Bahía Honda y a las presas La Paila y El Gozo. Además, se han realizado numerosos estudios para la construcción de viviendas, obras sociales, industrias y otros objetivos económicos. Estas investigaciones, contenidas en el archivo de la ENIA de Pinar del Río, constituyen una base geotécnica indispensable para el presente trabajo.

II.2.2. Geología del área

Desde el punto de vista regional, la provincia de Pinar del Río la dividen en dos grandes zonas estructuro-faciales: la Zona Guaniguanico, en la que destacan la presencia de dos subzonas, Sierra de los Órganos y Sierra del Rosario, y la Zona Zaza, la que subdividen en dos subzonas, San Diego de los Baños y Bahía Honda (Martínez et al., 1994).

Algunos autores (Pietrowska, 1987; Lewis y Draper, 1990; Pszczolkowski, 1994; Iturralde-Vinent, 1994; etc.) utilizan el término terreno, donde un terreno tectonoestratigráfico es definido siguiendo los criterios de Howell et al. (1985).

El área objeto de estudio se extiende por la subzona San Diego de los Baños. Según Furrázola-Bermúdez et al. (1964), Meyerhoff y Hatten (1968), Khudoley y Meyerhoff (1971), Judoley y Furrázola-Bermúdez (1971), las zonas estructuro faciales San Diego de los Baños y Bahía Honda son una continuidad de la Zona Zaza, que se encuentra en la parte central de Cuba. En opinión de los mencionados autores, la Zona Zaza

representa el eugeosinclinal en el ortogeosinclinal cubano (Khudoley y Meyerhoff, 1971). El nombre de Zona Zaza fue introducido por Hatten. Más tarde esta denominación fue aceptada por muchos autores (Furrazola-Bermúdez y otros, 1964; Meyerhoff y Hatten, 1968; Khudoley y Meyerhoff, 1971; Judoley y Furrazola-Bermúdez, 1971).

En Cobiella Reguera (2007) se propone dividir el Terciario bajo de Cuba en cinco zonas estructuro-faciales, que cubrirían del Paleoceno al Eoceno Medio:

- 1) Zona Turquino
- 2) Zona Cauto
- 3) Zona Camagüey
- 4) Zona Cabaiguán
- 5) Zona Sagua

Esta distribución de los estratos del Paleoceno-Eoceno Medio está determinada por dos fenómenos:

1. Las deformaciones tectónicas a lo largo de las regiones central y occidental del territorio.
2. El arco volcánico y estructuras vinculadas en el sur de Cuba oriental.

El rasgo más distintivo de esta zonalidad es la disminución en el contenido de material volcánico de sur a norte (menos marcadamente, de este a oeste). Adicionalmente, hay una tendencia, no siempre manifiesta, al incremento en la magnitud de las deformaciones tectónicas del Terciario temprano en dirección al norte.

Según esta subdivisión, el objeto de estudio de esta tesis se localizaría en la Zona Cabaiguán. El corte está dominado por sedimentos terrígenos, mayormente turbiditas, derivados de islas que estaban ubicadas al sur de la cuenca (Z. Camagüey) donde se acumulaban las turbiditas. Por tanto, los cortes de la Zona Cabaiguán presentan la apariencia de las secuencias de flysch, conocidas en muchos lugares del planeta. Los sedimentos de la Zona Cabaiguán son el relleno de pequeñas cuencas desarrolladas en el dorso de los nappes (cuencas a cuestras o piggy back basins) que se desplazaban hacia el norte durante los eventos tectónicos ocurridos entre el Paleoceno Tardío y el Eoceno Medio (orogénesis cubana).

II.2.3. Estratigrafía

El corte se caracteriza por el desarrollo de formaciones geológicas que van desde el Eoceno Medio parte alta (Loma Candela) hasta los sedimentos más jóvenes del Pleistoceno Superior y aluviales recientes muy bien estudiados por investigaciones ingeniero geológicas (figura II.4).

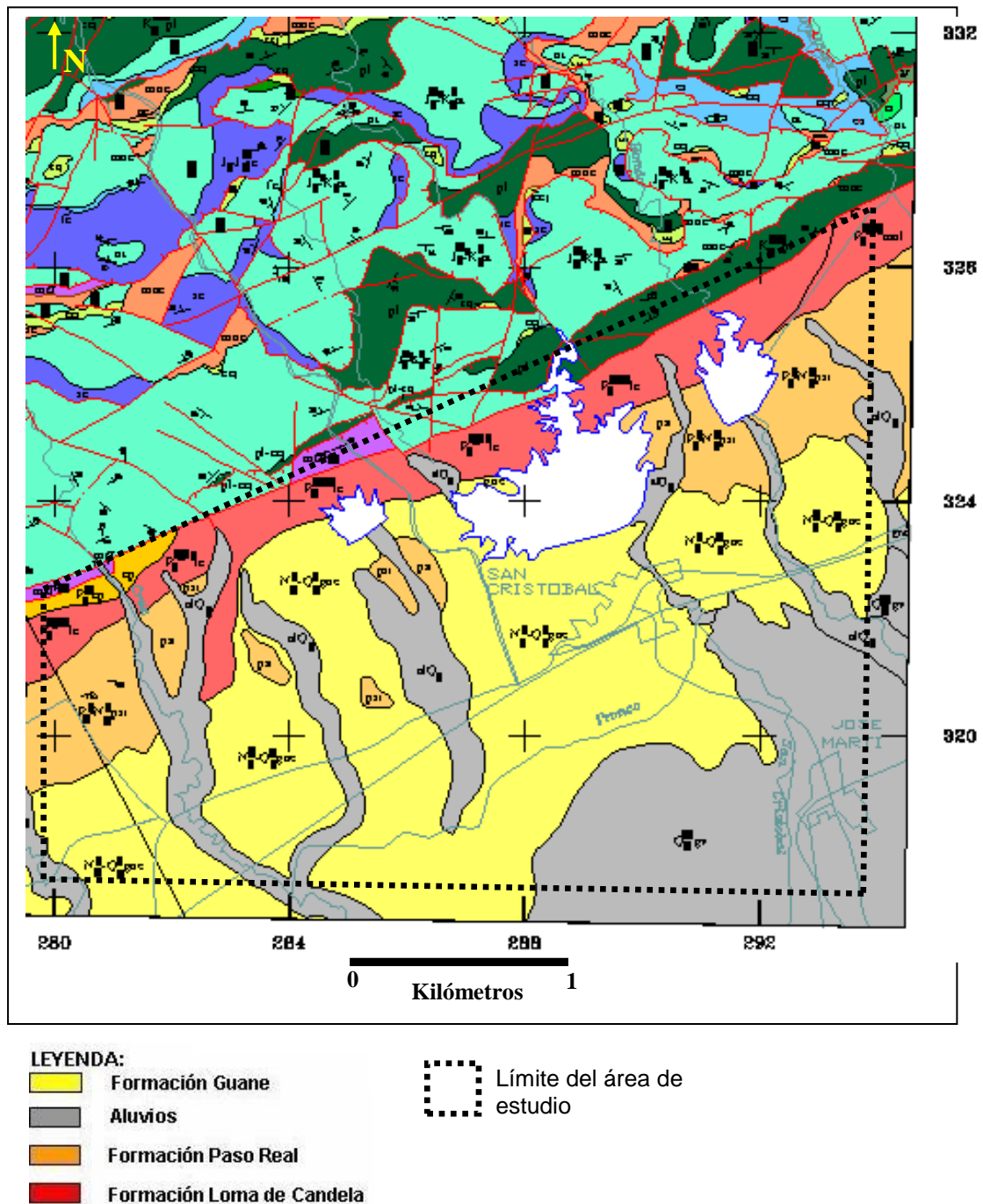


Figura II.4. Mapa geológico de la zona de estudio. Confeccionado por el Instituto de Geología y Paleontología de Cuba en el año 2008. Escala original 1:50 000.

Se ofrece a continuación una descripción de las formaciones geológicas que afloran en el área de estudio, contenida en Franco (1994).

➤ **Formación Loma de Candela**

Autor: P. J. Bermúdez (1950)

Área tipo: Loma Candela, provincia de Pinar del Río.

Distribución geográfica: Se desarrolla limitadamente, en forma de fajas alargadas y discontinuas, al sur de la Cordillera de Guaniguanico, provincia de Pinar del Río.

Litología: Arcillas calcáreas, calizas arcillosas, margas, areniscas calcáreas, gravelitas y conglomerados.

Relaciones estratigráficas: Yace discordantemente sobre los grupos Mariel (formaciones Capdevila y Madruga) y Universidad (Formación Toledo). Está cubierta transgresivamente por la Formación Paso Real (parte indiferenciada y su Miembro. Baños).

Espesor: 250-300 m.

Edad: Eoceno Medio parte alta.

➤ **Formación Paso Real**

Autor: P. J. Bermúdez (1950)

Subdivisión: Miembro. Baños (miembro basal).

Unidad principal: Gr. Guacanayabo.

Área tipo: Llanura meridional de la provincia de Pinar del Río.

Litología diagnóstica: Son característicos en ella los cambios litológicos abruptos tanto vertical como lateralmente. Predominan las alternancias de calizas y margas. Las calizas son arcillosas, biodetríticas arcillosas y más subordinadamente calizas biohémicas, calizas dolomitizadas, dolomitas y calcarenitas. Las calizas arcillosas por desagregación originan pseudoconglomerados calcáreos de matriz margoso- arenácea. En general son masivas. Las margas, al igual que las calizas son fosilíferas. Aparecen intercalaciones de areniscas y limolitas calcáreas y arcillas (principalmente esmectita) que contienen en algunos horizontes piritita, yeso, halita y lignito. En el área tipo se observa en la base un conglomerado polimítico de matriz margosa, fosilífera. La estratificación está enmarcada por los cambios litológicos y es frecuentemente lenticular. Colores crema, blancuzco y grisáceo en los horizontes carbonáticos y grisáceo y verdoso en los terrígenos.

Relaciones estratigráficas: Yace concordantemente sobre las formaciones Báguanos, Camazán, Colón, Jaruco, Lagunitas y Sevilla Arriba y discordantemente sobre las formaciones Arroyo Blanco, Artemisa, Caobilla, Capdevila, Chambas, Charco Redondo, Chirino, El Embarcadero, Florida, Grande, Guáimaro, Jatibonico, Loma Candelaria, Los Negros, Marroquí, Mata, Peñón, Presa Jimaguayú (parte indiferenciada y sus miembros Chorrillo y Portillo), Río Yáquimo, San Cayetano, San Luis, Santa Teresa, Veloz, Venero, Vertientes, Vía Blanca, los grupos Mariel, Remedios y Universidad, el Miembro. Berrocal (Formación Crucero Contramaestre), los complejos Esmeralda y Mabujina y las ultramafitas y granitoides. Está cubierta concordantemente por las formaciones Güines, Loma Triana y Manzanillo y discordantemente por las formaciones Bayamo, Cauto, Guane, Guevara, Punta del Este, Sigüanea, Vedado y Villarroja. Transiciona lateralmente con las formaciones Arabos, Cojímar, Güines, Lagunitas, Río Jagüeyes y el Grupo Nipe (Formación Camazán).

Espesor: Oscila entre 30 y 1 640 m (este último en el pozo Candelaria 1 e incluye al Miembro. Baños).

Edad: Oligoceno Superior- Mioceno Superior basal.

➤ **Formación Guane**

Autor: I. P. Kartashov *et al.*, (1976)

Área tipo: Faja irregular que se extiende desde los alrededores del pueblo de Sandino hasta el de Mantua, provincia de Pinar del Río.

Holoestratotipo: Corte de 2 m ubicado en una cantera próxima a la carretera de Luis Lazo, a 1 km del pueblo de Guane, provincia de Pinar del Río.

Distribución geográfica: Se desarrolla por el borde norte de la llanura meridional de la provincia de Pinar del Río. También se ha observado al norte de la ciénaga de Lanier, Isla de la Juventud.

Litología diagnóstica: Arenas silíceas, arcillas arenosas, gravas (angulosas y subangulosas) débilmente cementadas por arcillas. Presentan sus depósitos estratificación indefinida lenticular y más raramente cruzada. En su parte alta contiene concreciones ferruginosas y hardpan. Colores abigarrados.

Relaciones estratigráficas: Yace transgresivamente sobre las formaciones Capdevila y Paso Real. Está cubierta discordantemente por la Formación Guevara.

Espesor: Según datos de perforaciones puede alcanzar hasta 50 m.

Edad: De acuerdo a su posición estratigráfica se le ha asignado una edad Plioceno Superior- Pleistoceno Inferior.

➤ **Depósitos cuaternarios**

Están representados por depósitos aluviales recientes y deluvios. Los primeros están constituidos por limos, limos arenosos y arcillas arenosas, mientras que los segundos son suelos de composición arcillosa con gravas.

II.2.4. Tectónica

Este epígrafe ofrece algunos elementos sobre la tectónica de la zona estructuro-facial San Diego de los Baños (ZEFSB). Esta síntesis permitirá ubicar el objeto de estudio en el contexto tectónico de la región. Por los objetivos de la tesis, se presta especial interés a la falla Pinar, principal estructura tectónica de la región, límite norte de la ZEFSB y supuestamente la principal estructura sismogeneradora del occidente cubano.

Las unidades tectónicas de la provincia de Pinar del Río pertenecen al sistema orogénico de las Antillas Mayores y se formaron durante el Terciario. La fase orogénica principal ocurrió en el Eoceno Medio (Khudoley, 1967), aunque durante el Cretácico Superior Temprano, en el geosinclinal cubano, comenzaron los movimientos orogénicos tempranos.

➤ **Rasgos de la tectónica en la ZEFSB**

La zona estructuro-facial San Diego de los Baños se encuentra situada al sur de la zona Guaniguanico, y está separada de esta por la falla Pinar. Su límite sur se extiende entre la costa meridional de Cuba e Isla de la Juventud (Furrazola-Bermúdez, Judoley y otros, 1964; Judoley y Furrazola-Bermúdez, 1971). Según se señaló con anterioridad la zona San Diego de los Baños es una contrapartida de la zona Zaza de la parte central de Cuba.

Formaciones del Cretácico Superior y Paleógeno afloran en esa zona. Se observa una discordancia entre la formación San Juan y Martínez, del Cretácico Superior, y la Formación Capdevila (Paleoceno Superior, Eoceno Inferior). Los sedimentos de la Formación Loma Candela, del Eoceno Medio Tardío (la primera depositada con posterioridad a la fase orogénica principal), cubren transgresivamente a las formaciones más antiguas con una discordancia de aproximadamente 12°.

Los sedimentos no son similares a los sedimentos contemporáneos de la zona Guaniguanico. Los depocentros de estas zonas probablemente están distanciados entre

sí. Su vecindad actual puede ser explicada con facilidad mediante la hipótesis de un desplazamiento horizontal de aproximadamente 160 a 180 km a lo largo de la falla Pinar (Piotrowska y Pszczółkowski en Pszczolkowski y otros, 1975).

La ZEFSB es poco conocida debido al recubrimiento de las formaciones más antiguas por los sedimentos del Neógeno y el escaso número de perforaciones exploratorias. Los datos accesibles no permiten definir su tectónica. De acuerdo con opiniones previas (Furrazola-Bermúdez, Judoley y otros, 1964) esa zona fue una estructura muy poco perturbada, que se inclina monoclinamente hacia el sur, dentro la cual se encuentra localizada la cuenca de Los Palacios, rellena con sedimentos del Paleógeno y el Neógeno, y con un espesor considerable (Khudoley y Meyerhoff, 1971). El eje de esta cuenca muestra una dirección noroeste-suroeste.

De acuerdo con los datos de las perforaciones se observa un rápido descenso de la superficie superior de los sedimentos del Eoceno inferior y/o del Cretácico. De forma simultánea se observa en la misma área, un rápido incremento del espesor de los sedimentos, desde el Eoceno Superior hasta el Mioceno. La distribución del espesor de los sedimentos muestra, de manera clara, que la cuenca de los Palacios ha sufrido una subsidencia considerable durante la deposición. Allí rediferenciaron dos pisos estructurales, a saber: el preorogénico (los términos “pre” y “postorogénico” se refieren aquí a la fase orogénica principal), consiste en las formaciones San Juan y Martínez, Capdevila y Universidad, y el postorogénico que se encuentra representado por sedimentos de las formaciones Loma Candela, Paso Real y otras más jóvenes.

Los datos de las perforaciones existentes resultan insuficientes para desarrollar un análisis de la potencia del piso estructural inferior, por lo cual resulta imposible definir con exactitud si la cuenca de Los Palacios se ha originado antes o después del Eoceno Medio. El espesor constante de los sedimentos del Eoceno inferior (aunque no en todas las perforaciones se logró distinguirlo) sugiere que la cuenca Los Palacios comenzó su desarrollo durante la fase orogénica principal y adaptó su forma a las tendencias estructurales más antiguas; es por esto que puede considerarse postorogénica (Piotrowska en Pszczółkowski y otros, 1975).

El desarrollo de facies (Myczynski y Piotrowski en Pszczółkowski y otros, 1975), así como las unidades tectónicas de la zona estructuro-facial San Diego de los Baños señalan una historia geológica de esa zona diferente a la de Guaniguanico. El carácter facial de la Formación San Juan y Martínez del Cretácico Superior (Myczynski y Piotrowska en Pszczółkowski y otros, 1975) sugiere una deposición intranquila durante

movimientos orogénicos crecientes. Los contactos transgresivos y las discordancias en las rocas del Paleógeno son muestras de movimientos verticales de consideración. La transgresión del Eoceno Medio (Formación Loma Candela), cubrió el área de la Zona San Diego de los Baños, que en ese tiempo era un sistema de pliegues anchos de pequeña amplitud. No está excluida la posibilidad de que la zona San Diego de los Baños posea una estructura de nappes.

Investigaciones geodésicas han determinado movimientos oscilatorios en la Llanura Sur de Pinar del Río entre 2 y 4 mm al año. En este sentido Iturralde-Vinent (1978, 1998) propone dividir el archipiélago cubano en bloques neotectónicos (Terciario Superior). Esta subdivisión denomina bloques hórsticos aquellos que han mantenido una tendencia al levantamiento desde el Eoceno Superior, y bloques grabens los sometidos a una tendencia contraria (figura II.5).

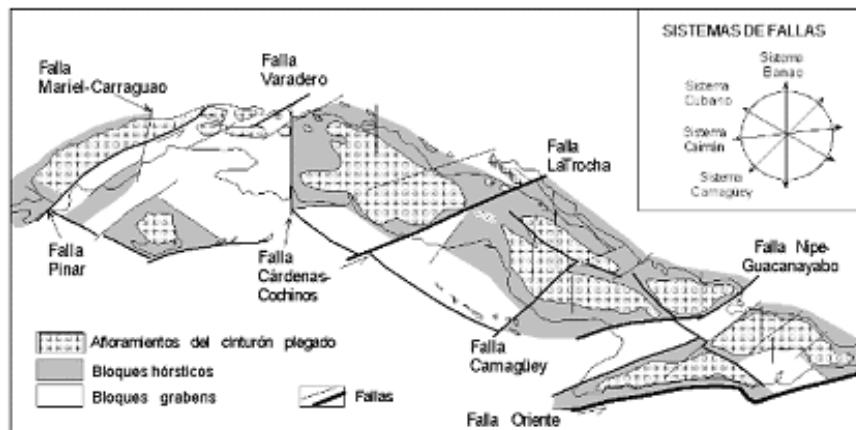


Figura II.5. Mapa de la estructura en bloques de Cuba en el Terciario Superior (bloques neotectónicos). Simplificada de Iturralde-Vinent (1978, 1998).

Características generales de la falla Pinar

Según Furrázola-Bermúdez y otros (1964), se trata de una fractura profunda de 160 km de largo y de 3000 m de desplazamiento vertical. Su superficie escarpada se inclina hacia el sudeste. La falla Pinar está señalada en perfiles por Hatten (1957) y por Truitt y Bronnimann (1956). Según la opinión de Meyerhoff (en Khudoley y Meyerhoff, 1971) la falla Pinar es del tipo de rechazo horizontal y está todavía activa (ver McGillavry, 1970). Meyerhoff y Hatten (1974) mantienen que se prolonga hacia el noreste hasta el Estrecho de la Florida.

La falla Pinar separa dos zonas que difieren una de otra en facies y en tectónica. Al igual que la falla Oriente tiene una larga vida, que se inicia en el Eoceno, y se extiende hasta hoy, con cambios en la naturaleza de los movimientos.

Según la distribución de facies del Neógeno, en el área de la ZEFSB y de la margen occidental de la zona Guaniguanico, se puede asumir que los desplazamientos principales de la falla Pinar han ocurrido antes de la transgresión del Mioceno (Formación Paso Real) aunque la falla todavía ha estado activa (Piotrowska, 1987).

Al sur de Soroa se han observado espejos tectónicos con estrías de deslizamientos oblicuos (45°). Esto sugiere un desplazamiento de carácter vertical y horizontal de la falla, al menos en algunas de sus fases del desarrollo.

Khudoley en Meyerhoff (1971) y Piotrowska en: Pszczółkowski et al. (1975) proponen el desarrollo de la falla Pinar después o durante la fase final de los sobrecorrimientos en la zona Guaniguanico. Al final del Eoceno Inferior, al norte de esa zona debe de haber estado situada una zona que abarca las actuales zonas Bahía honda y San Diego de los Baños. Los cizallamientos iniciales de la falla Pinar estuvieron orientados en ángulo agudo al límite de las zonas Guaniguanico y Zaza. Así, se ha formado una falla la cual provocó un desplazamiento horizontal de la porción noroccidental hacia el noreste; como consecuencia de este desplazamiento existiría una falla dextral. El rechazo horizontal total no tendría menos de 160 a 180 km, porque sería necesario desplazar la cordillera de Guaniguanico hacia atrás a lo largo de la falla Pinar, para poder situar los fragmentos de la zona Zaza en su supuesta posición inicial. En el Eoceno Superior y en el Oligoceno, los supuestos rechazos horizontales fueron acompañados por rechazos verticales u oblicuos (también durante el Mioceno). El valor del desplazamiento vertical, según los autores citados, pudo haber alcanzado 1 500-2 000 m.

Pero no todos los investigadores vinculados con el estudio de la falla Pinar han coincidido. Desde los criterios de Rigassi Studer (1963), donde ignora su existencia, hasta Díaz et al. (1987) que describe su funcionamiento como una estructura profunda que origina desplazamientos de bloques del basamento; se perciben criterios opuestos. Otros la han descrito como un sistema de fallas normales imbricadas de norte a sur (Martínez y Fernández de Lara, 1988), como una falla de desplazamiento diestro (Piotrowska, 1976), o como una falla de desplazamiento sinistral (Gordon et al., 1997). Cofiño y Cáceres (2003), a través de mediciones de elementos estructurales observados en microestructuras, que se originan como resultado de los movimientos de la falla Pinar, lograron detectar e interpretar diversos indicadores cinemáticos. Las estructuras

fueron mapeadas en las inmediaciones de la zona de la falla Pinar, desde las cercanías del poblado de San Cristóbal en Pinar del Río, hasta cerca del caserío de Cayajabos en la provincia de La Habana. La totalidad de estas observaciones se realizaron siguiendo el rumbo W-E de dicha estructura.

A partir de las mediciones de microestructuras (planos de falla, grietas, vetillas, pliegues) y su posterior análisis, Cofiño y Cáceres (2003) proponen la evolución en el tiempo para la falla Pinar. Según estos autores, la falla en un principio funcionó como una fractura de riedel principal originada a partir de la rotación hacia el noreste del stress principal durante los cabalgamientos ocurridos en el Eoceno Inferior (Gordon et al. 1997), la presencia de estructuras de esquistosidad, cizallamiento, de bookshelf sliding, tiling o imbrication de objetos descritos macroscópicamente explicados en Passchier and Trouw (1998) confirman su funcionamiento como una gran zona de shear con desplazamiento siniestro.

Otros indicadores detectados, medidos y mapeados (estrias y escamas de calcita, etc.) en varios puntos a lo largo de su rumbo dan elementos para comprender que en la evolución de esta gran estructura han intervenido otros desplazamientos subhorizontales hasta gravitacionales al final de su desarrollo. De forma general, el sistema de falla Pinar en la actualidad tiene un buzamiento subvertical hacia el sur (70°-80°) y se extiende en profundidad en el orden de 10 km.

II.3. Sísmicidad de la región de estudio

Según el mapa de zonificación sísmica con fines de ingeniería, contenido en la norma cubana NC 46:1999, en el área de estudio pertenece a la Zona 1A, la cual se caracteriza por un riesgo sísmico bajo, sin efectos dañinos para las construcciones, donde no es necesario tomar medidas sismorresistentes en estructuras y obras. No obstante, desde el punto de vista sismológico, no puede decirse que existe sísmicidad nula (ver catálogo de terremotos en anexo I).

En un trabajo posterior sobre la caracterización de la amenaza sísmica a esperar para el territorio nacional (Chuy, 2002), el municipio de San Cristóbal queda incluido dentro de la zona con intensidad MSK comprendida entre 6.0-7.0 grados y una aceleración horizontal de 40-90 cm/s² (0.04 g-0.09 g, donde $g \cong 1000 \text{ cm/s}^2$ es la aceleración de la gravedad) para suelos de consistencia media (S2), una probabilidad de ocurrencia del 15 % y un tiempo de vida útil de 50 años (figura II.6).



Figura II.6. Caracterización de la amenaza sísmica en la República de Cuba (Chuy, 2002).

Datos más recientes calculados en el Centro Nacional de Investigaciones Sismológicas para una cuadrícula con centro en las coordenadas 22.712 N y 83.035 W (San Cristóbal) arrojaron los siguientes valores de las aceleraciones horizontales pico (Ah) para diferentes períodos de recurrencia (T) y suelos S1:

| T, años | Ah, %g | Ah, cm/s ² |
|---------|--------|-----------------------|
| 50 | 0.063 | 63 |
| 100 | 0.077 | 77 |
| 200 | 0.093 | 93 |
| 475 | 0.117 | 117 |
| 1 000 | 0.152 | 152 |
| 5 000 | 0.314 | 314 |
| 10 000 | 0.424 | 424 |
| 50 000 | 0.756 | 756 |

II. 4. Conclusiones del capítulo

- El relieve del área de trabajo presenta una baja disección vertical por lo que no se considerará la inclusión de esta variable en la determinación del peligro sísmico.
- Hay un desarrollo considerable de la infraestructura socioeconómica en la región, lo que justifica la realización de la zonación sísmica.

- La falla Pinar es la fuente sismogeneradora principal, presentando desplazamientos horizontales y gravitacionales durante su evolución, con un buzamiento hacia el sur entre 70°- 80° y una profundidad de aproximadamente 10 km.
- Relacionando la posición y el buzamiento de la falla Pinar con la ubicación del epicentro del terremoto más fuerte en Cuba occidental (San Cristóbal, 1880), ubicado al sur de dicha falla, se infiere la posible ubicación de futuros focos de terremotos, cuya posición según los indicadores tratados sería hacia el sur de la referida falla Pinar.

Capítulo III. Materiales y métodos utilizados

En el capítulo I se refieren dos grupos de metodologías para determinar la incidencia de las condiciones ingeniero geológicas en la zonación sísmica. Las **metodologías cualitativas** proponen un incremento de la intensidad sísmica mediante el criterio de experto, en función de la geología y los efectos observados en áreas ya estudiadas. Por otro lado están las **metodologías cuantitativas** que se fundamentan en relaciones matemáticas empíricas que expresan el incremento de intensidad macrosísmica en función de diferentes parámetros geotécnicos característicos de las capas superficiales, como, por ejemplo, la velocidad de propagación de las ondas de cizalla (V_s) y la densidad natural de los suelos o rocas.

Para este caso de estudio se pretende aplicar el método de analogías ingeniero geológicas propuesto por Popov (1959) y el método de rigidez acústica (Medvedev, 1973 y Kogan et al., 1974). Además, se realizará una zonación de acuerdo al coeficiente de amplificación del terreno.

III.1. Caracterización de la información empleada

El primer paso para determinar la influencia de las condiciones ingeniero geológicas en la zonación sísmica local es la recopilación de datos que caractericen el subsuelo. Los datos disponibles son:

- Esquema ingeniero geológico 1:25 000 (Ordaz et al., 2009)
- Datos sobre la profundidad de yacencia de las aguas en los depósitos cuaternarios.

III.1.1. Esquema ingeniero geológico 1:25 000

Las condiciones ingeniero-geológicos locales pueden influir en la intensidad y frecuencia de las oscilaciones del terreno producidas por los terremotos, modificando los efectos de los mismos en las diferentes partes de un área, y creando escenarios de peligro sísmico local, donde pueden ser amplificados los movimientos del terreno u ocurrir deformaciones sísmicas residuales.

El esquema ingeniero geológico para San Cristóbal y áreas aledañas se elaboró siguiendo los procedimientos descritos en la norma NC 51-24:84 “*Mapas ingeniero geológicos. Procedimientos para su elaboración*”. Para la escala de trabajo (1:25 000) y

la categoría según la complejidad geológica (A-Simple), según la citada norma; se debe contar con al menos 9 puntos de documentación ingeniero geológica (PDIG) por km². El área de estudio ocupa 98 km² y se cuenta con 115 PDIG, con una relación km²/PDIG inferior a la establecida.

A partir del análisis anterior se decide adoptar la denominación de “*Esquema*”. En el anexo II se muestra la distribución de los PDIG en el área de trabajo y se resalta un sector de 15 km² donde existe buen grado de estudio, cuya área clasifica como *mapa ingeniero geológico*. En dicho polígono se concentra la parte más importante de la infraestructura socioeconómica de San Cristóbal.

La base de la representación en el esquema son los complejos ingeniero geológicos (CIG). En el sector se definen 4 complejos para los depósitos de cubierta y 2 para las rocas (anexo III). En el anexo IV se pueden obtener los rangos de variación de los índices físico mecánicos de los depósitos de cubierta.

➤ **Depósitos de cubierta**

Complejo No. 1: Depósitos aluviales recientes (al)

Se relacionan, fundamentalmente, con las terrazas de los ríos San Cristóbal y Santa Cruz. Están constituidos por arcillas poco arenosas, arcillas limosas, arenas y gravas arenosas, de color carmelita con vetas grises, que clasifican por el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS) como suelos CH, SC y GC.

Complejo No. 2: Depósitos aluvial marinos del Plioceno-Cuaternario (alm)

Constituyen los suelos de cubierta en la mayor parte del territorio situado al sur de la falla Pinar, siendo los más estudiados al ser base de la mayoría de las obras investigadas. Los límites de propagación de estos suelos están mejor definidos que para el caso de los aluviales. Están representados por arcillas, arcillas arenosas y arenas arcillosas con gravas, muy oxidados, de color variado (rojo, marrón, ocre, con vetas grises y blancas de caolín), los que clasifican por el SUCS como CL, CH, SC y GC. Estos suelos pertenecen a las Formaciones Guane y Guevara.

Complejo No. 3: Depósitos eluviales de la Formación Paso Real (el psr)

Estos depósitos se extienden al sur de la falla Pinar, subyaciendo a los suelos aluviales marinos y con cierta aflorabilidad en las cercanías de la falla Pinar. Los mismos representan la parte superior, muy intemperizada, de la Formación Paso Real. Están

constituidos por arenas arcillosas con gravas y fragmentos de calizas y gravas arcillosas, de colores amarillo, beige y naranja, clasificando por el SUCS como SC y GC.

Complejo No. 4: Depósitos deluviales y eluviales de la Formación Loma Candela (dl-el lc)

Su distribución coincide con la Formación Loma Candela, de edad Eoceno Medio, la que se extiende formando una franja de 300 a 1200 metros al sur de la falla Pinar. Es una zona con muy bajo grado de estudio geotécnico, siendo escasa la información disponible. Los suelos se describen como arenas arcillosas con gravas, de color variado (rojizo, carmelita, con manchas negras), que clasifican como SC por el SUCS.

➤ **Complejos rocosos**

Las formaciones rocosas están muy poco estudiadas desde el punto de vista ingeniero geológico, no existiendo en el sector estudiado ensayos de laboratorio que aporten información geotécnica sobre las mismas.

Complejo No. 5: Complejo terrígeno-carbonatado del Neógeno (psr)

Está formado por las rocas de la Formación Paso Real, las que se extienden al sur de la falla Pinar, donde constituyen el horizonte rocoso y el principal acuífero del territorio. Sobre estas rocas se desarrolla el Complejo No. 3. Aflora, fundamentalmente, en la parte suroeste del área de estudio, estando representado litológicamente por alternancias de calizas y margas, fosilíferas, carsificadas, de colores crema, blancuzco y grisáceo en los horizontes carbonáticos, y grisáceo y verdoso en los terrígenos. A continuación, se presentan algunos de los parámetros que caracterizan a esta formación.

| Litología | Resistencia a la compresión (MPa) | |
|-----------|-----------------------------------|----------|
| | Seca | Saturada |
| Calizas | 11.44 | 7.51 |
| Margas | 5.02 | 1.94 |

Fuente: Archivo ENIA, Pinar del Río.

| Formación | Densidad (g/cm ³) | | | | |
|-----------|-------------------------------|-------|------|------|------|
| | No. muestras | Media | Moda | Min | Max |
| Paso Real | 36 | 2,25 | 2,19 | 1,79 | 2,63 |

Fuente: Bases de datos petrofísicos por formaciones geológicas, levantamiento CAME.

Complejo No. 6: Complejo terrígeno del Paleógeno (lc)

Este complejo se asocia con las rocas poco meteorizadas de la Formación Loma Candela, en cuya composición litológica predominan arcillas calcáreas, calizas arcillosas, margas, areniscas calcáreas, gravelitas y conglomerados.

| Formación | Densidad (g/cm ³) | | | | |
|--------------|-------------------------------|-------|------|------|------|
| | No. muestras | Media | Moda | Min | Max |
| Loma Candela | 42 | 2,52 | 2,65 | 1,93 | 2,67 |

Fuente: Bases de datos petrofísicos por formaciones geológicas, levantamiento CAME.

III.1.2. Niveles de aparición de agua en los depósitos cuaternarios

Dentro de los factores locales en la intensidad de manifestación de la sismicidad ejerce una influencia considerable el grado de inundación de las rocas. Desde el punto de vista ingeniero geológico, el agua contenida en los sedimentos cuaternarios es la más importante.

Resulta especialmente peligroso el hecho de que los terremotos pueden generar el fenómeno de licuefacción al coincidir espacialmente sedimentos arenosos y niveles de agua cercanos a la superficie, que no sobrepasen los 15 metros (González de Vallejo et al., 2002). A su vez, Lomtatze (1977) propone aumentos de la intensidad sísmica de 0.5-1 grado en suelos arenosos, arcillosos y arenas de grano fino para profundidades de las aguas subterráneas que no superen los 4 metros.

Los datos sobre la profundidad de yacencia del agua subterránea se obtuvieron de 22 calas perforadas en el área de estudio. En la tabla III.1 se muestra el código de la cala, coordenadas y profundidad del nivel de aparición de agua.

Tabla III.1. Perforaciones en el área de estudio con niveles de aparición de agua.

| Código | Coordenadas | | Nivel de agua, m |
|----------|-------------|---------|------------------|
| | X | Y | |
| SC-277-1 | 288625 | 322050 | 4.5 |
| SC-146-1 | 288750 | 321600 | 6.7 |
| SC-146-9 | 288800 | 321625 | 1.8 |
| SC-198-1 | 289850 | 322250 | 8.55 |
| SC-154-1 | 291000 | 322000 | 6.0 |
| SC-054-1 | 288800 | 322125 | 12.6 |
| SC-166-1 | 289850 | 322250 | 1.5 |
| SC-265-9 | 289050 | 322050 | 1.6 |
| SC-113-1 | 290350 | 322700 | 5.6 |
| SC-051-1 | 290500 | 322700 | 4.35 |
| SC-176-1 | 290.000 | 320.650 | 7.8 |
| SC-153-1 | 285.050 | 320.850 | 7.8 |
| SC-261-1 | 285.200 | 318.950 | 1.5 |
| SC-260-1 | 286.950 | 320.125 | 4.7 |
| SC-256-1 | 289.050 | 322.050 | 1.5 |

Fuente: Archivos ENIA, Pinar del Río.

La presa La Paila, ubicada apenas 1500 m del centro del pueblo de San Cristóbal, cuenta con un volumen de embalse de 60 Hm³, ejerciendo influencia directa en la saturación de los sedimentos cuaternarios del área. González et al. (2001) realiza una comparación de los niveles de agua asociados a estos sedimentos antes y después de la construcción de la presa. Los niveles aguas abajo del citado embalse se encontraban a profundidades entre 6 y 12 m. Luego de construida la presa, en obras investigadas recientemente, los niveles se ubican entre 2 y 6 m.

Según Ramos et al. (1993) en González et al. (2001), durante la construcción de los túneles populares en el pueblo de San Cristóbal, los trabajos de laboreo oscilaron entre los 2 y 4 m de profundidad. Para estas profundidades y materiales arcillosos y arcillas arenosas, se determinaron caudales entre 0.5-1.0 L/s; la salida del agua era en forma de pequeños chorros por planos de grietas. Este autor relacionaba la salida del agua con la variación de los niveles de agua en el embalse La Paila.

III.2. Métodos empleados para determinar la respuesta del suelo

Con el objetivo de establecer la respuesta del macizo geológico del pueblo de San Cristóbal y sus alrededores frente a un evento sísmico, en correspondencia con la información disponible se propone realizar:

- Zonación del incremento de la intensidad sísmica respecto a la roca granítica mediante el método de analogías ingeniero geológicas.
- Zonación del incremento de la intensidad sísmica respecto a la roca granítica mediante el método de rigidez sísmica.
- Zonación del coeficiente de amplificación del terreno.

III.2.1. Analogías ingeniero geológicas

El método consiste en definir dentro del área de estudio perfiles geológicos similares a determinadas condiciones típicas, en las que las variaciones de las intensidades sísmicas son conocidas. Algunos autores han propuesto variantes de este método (Popov, 1959; Medvedev, 1962; Schnekova y Prochaikova, 1981). Las dos últimas determinaron la variación de la intensidad sísmica para distintas litologías (calizas, granitos, marga, yeso, areniscas, conglomerado, arcilla, arena, etc.) con diferentes profundidades de las aguas subterráneas.

Para este caso de estudio se aplicará la propuesta de Popov (1959), mostrándose en el anexo V la descripción de de cada corte geológico típico y la variación de la intensidad sísmica esperada. La misma fue confeccionada a partir de observaciones de los efectos de terremotos, realizadas por dicho autor en zonas donde se conocía detalladamente el corte de suelos, la profundidad de los niveles freáticos, el buzamiento de los estratos y la relación en la potencia entre los mismos, hasta profundidades mayores de 40 m. Con el apoyo del anexo V se pueden estimar los incrementos y decrementos del grado sísmico regional con respecto al suelo promedio o a la roca dura, para cortes descritos en nuevas áreas.

III.2.2. Rigidez sísmica

Según Lomtadze (1977), la rigidez es la propiedad de las rocas de oponer resistencia al surgimiento de deformaciones, mientras que la rigidez sísmica caracteriza la resistencia de las rocas a la propagación de las deformaciones que surgen en las mismas. La rigidez sísmica (v_γ) está dada por la expresión:

$$v_\gamma = v_s \cdot \gamma$$

donde:

V_s , velocidad de propagación de las ondas transversales,

γ , densidad de las rocas.

El método se basa en la comparación de los valores de la rigidez sísmica del suelo con la rigidez sísmica de un suelo patrón (Medviedev, 1973). Los incrementos de intensidad sísmica (ΔI) se determinan con ayuda de la fórmula:

$$\Delta I = 1.67 \log \rho_0 V_0 / \rho_i V_i$$

donde:

V_0, V_i son las velocidades de propagación de las ondas sísmicas transversales de las rocas graníticas y de la capa de suelo investigada, respectivamente;

ρ_0, ρ_i sus correspondientes densidades.

Para la aplicación de la fórmula de Medviedev, es necesario conocer la velocidad de las ondas transversales de los suelos del área de estudio; así como su densidad natural (conocida en geotécnica como peso específico natural). Como suelo patrón se utiliza la roca granítica dura con una rigidez acústica de 9361, obtenida como resultado del producto de una densidad de 2.64 g/cm³ y una velocidad de las ondas transversales de 3546 m/s.

La densidad natural de los diferentes suelos del área se obtuvo a partir de 110 perforaciones, donde se procesaron 85 muestras. Las perforaciones corresponden a 75 obras investigadas por especialistas de la Empresa Nacional de Investigaciones Aplicadas (ENIA) de Pinar del Río. En el anexo IV se muestran los valores promedios de los parámetros geotécnicos, las celdas resaltadas en amarillo indican los valores de densidad natural usados para determinar la rigidez sísmica.

En la provincia de Pinar del Río son muy escasas las mediciones de velocidades de las ondas sísmicas para los suelos y rocas más superficiales del corte geológico. Para determinar los valores de velocidad de las ondas transversales se utilizaron mediciones realizadas de velocidades de ondas longitudinales para suelos de igual génesis, pero fuera del área de estudio (Bustio, 1988).

Mediante la fórmula (Gurvich, 1972):

$$V_s = \sqrt{\frac{(1-2\nu)}{2(1-\nu)}} * V_p$$

se convirtieron los valores de velocidades de ondas longitudinales a transversales, donde:

V_s , velocidad de las ondas transversales,

V_p , velocidad de las ondas longitudinales,

ν , coeficiente de Poisson.

La mayoría de los cortes identificados en San Cristóbal están compuestos por más de una capa, cada uno de ellas con sus características geotécnicas y espesores diferentes. Por tanto, es necesario obtener un valor de V_s para el corte en esas condiciones (capa equivalente). Para la obtención de la capa equivalente, se utilizó el procedimiento propuesto por Masuda et al. (1979).

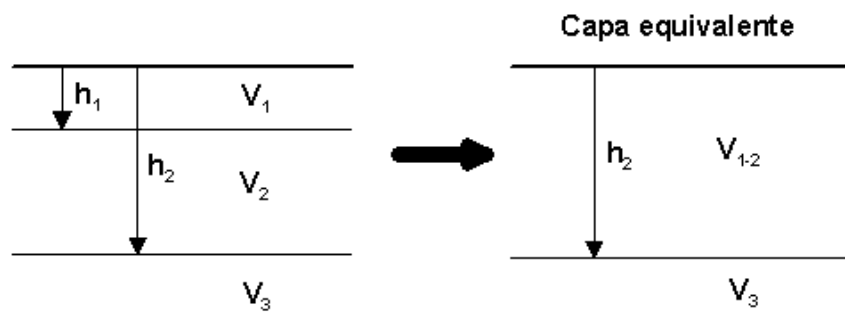


Figura III.1. Obtención de una capa equivalente (Masuda et al, 1979).

Las expresiones analíticas para determinar los parámetros de dicha capa equivalente son:

$$\frac{h_2}{V_{1-2}} = \left(\frac{h_1}{V_1} + \frac{h_2 - h_1}{V_2} \right)$$

la que, mediante toda una serie de transformaciones, se convierte en:

$$\frac{V_{1-2}}{V_2} = \frac{1}{1 + \frac{h_1}{h_2} \left(\frac{1 - K_1}{K_1} \right)} \quad \text{de donde se obtiene que} \quad V_{1-2} = \frac{V_2}{1 + \gamma \left(\frac{1 - K_1}{K_1} \right)}$$

donde:

$$\gamma = \frac{h_1}{h_2} \quad \text{y} \quad K = \frac{V_1}{V_2}$$

Para la obtención del mapa se consideró para cada una de las columnas tipo del esquema ingeniero geológico, un corte de 15 m de espesor desde la superficie del terreno, para el cual se calculó la rigidez sísmica. Los valores obtenidos se compararon con la rigidez sísmica del granito, calculándose de esa forma para cada corte representativo del área de estudio el incremento de la intensidad sísmica.

III.2.3. Zonación de la respuesta sísmica de los suelos en función del coeficiente de amplificación del terreno.

Una evaluación cuantitativa sencilla del comportamiento sísmico de los suelos puede efectuarse empleando el valor del coeficiente de amplificación del terreno C para los diferentes tipos de terrenos. El coeficiente C depende de las características geotécnicas y de la compactación del terreno, representando un coeficiente para la obtención de la aceleración sísmica de cálculo.

Este coeficiente tiene el mismo significado y valores aproximadamente iguales que el término γ_3 incluido en la fórmula de cálculo de la componente horizontal de la carga sísmica en la derogada norma cubana NC 53-114:1984 “Construcciones sismorresistentes. Especificaciones de proyectos y métodos de cálculo”.

En la norma cubana vigente NC 46: 1999 “Construcciones sismorresistentes. Requisitos básicos para el diseño y construcción”, se utiliza un procedimiento de cálculo que no requiere el uso de este coeficiente.

Para aplicar este método de zonación se establece una comparación entre los perfiles de suelos de la Norma Cubana NC 46:1999 y la Norma de Construcción Sismorresistente de España NCSE-02 (anexo VI), quedando definido por analogía un valor del coeficiente C para cada estrato de suelo. Se adopta como valor de C de todo el perfil el valor medio ponderado de los coeficientes de cada estrato con relación a su espesor, mediante la expresión:

$$C = \frac{\sum C_i * e_i}{15}$$

Donde C_i y e_i , representan el coeficiente de amplificación del terreno y el espesor de cada capa, respectivamente. El valor de 15 en el cociente depende de la profundidad máxima del corte investigado, que en este caso de estudio siempre es 15 m.

III.3. Conclusiones del capítulo

- Se cuenta con adecuado grado de estudio ingeniero geológico, lo que permite realizar una correcta zonación sísmica.
- Para determinar la respuesta del macizo geológico frente a eventos sísmicos se propone utilizar los métodos de analogías ingeniero geológicas, rigidez sísmica y la determinación del coeficiente de amplificación del terreno.

Capítulo IV. Resultados obtenidos

En el capítulo se realiza la zonación sísmica del territorio de estudio mediante la aplicación de los tres métodos anteriormente discutidos: analogías ingeniero geológicas, rigidez sísmica y coeficiente de amplificación del terreno. Los resultados obtenidos se presentan en forma de mapas de zonas con diferente peligrosidad sísmica, lo que facilita su aplicación práctica.

Al comparar la relación espacial entre dichas zonas y la infraestructura socioeconómica del área, se demuestra su valor para pronosticar posibles pérdidas o daños que pudieran producirse como consecuencia de los terremotos.

IV.1. Zonación del incremento de la intensidad sísmica respecto a la roca granítica.

Método de analogías ingeniero geológicas.

Sobre la base de las observaciones de sismos de gran intensidad, en zonas con diferentes condiciones ingeniero geológicas, Popov (1959) definió 18 perfiles geológicos típicos, permitiendo realizar un pronóstico de los posibles incrementos del efecto sísmico para estos perfiles, respecto a un corte compuesto por rocas duras cristalinas, poco alteradas (rocas graníticas) (anexo V).

Para el pueblo de San Cristóbal y áreas aledañas se han definido 9 columnas generalizadas que caracterizan cada una de los complejos en que se ha dividido el esquema ingeniero geológico. Se tuvo en cuenta la composición litológica de suelos y rocas, su potencia y profundidad de yacencia de las aguas subterráneas. En el anexo III (Esquema Ingeniero Geológico) se representa la ubicación de estas columnas según el sector del complejo ingeniero geológico (CIG) que representa.

A continuación, se presenta la descripción de los 9 cortes o columnas generalizadas identificadas en la región de San Cristóbal y su analogía con los propuestos por Popov.

i) Columna 1

| Capa | CIG | Espesor (m) | N.A. (m) | Según Popov (1959) | |
|------|-----------------------------|-------------|----------|--------------------|------------|
| | | | | Corte tipo | ΔI |
| 1 | Aluvial | 5 | <1,5 | 8 | 1.6 - 2.4 |
| 2 | Eluvios de la Fm. Paso Real | 10 | | | |

ΔI : Incremento de la intensidad sísmica con relación a la roca granítica (patrón),

CIG: Complejo ingeniero geológico,

N.A.: Nivel de aparición de agua.

ii) Columna 2

| Capa | CIG | Espesor (m) | N.A. (m) | Según Popov (1959) | |
|------|--------------------------------|-------------|----------|--------------------|------------|
| | | | | Corte tipo | Δl |
| 1 | Aluvial | 5 | <1.5 | 8 | 1.6 – 2.4 |
| 2 | Aluvial marino de la Fm. Guane | 7.5 | | | |
| 2 | Eluvios de la Fm. Paso Real | 2.5 | | | |

iii) Columna 3

| Capa | CIG | Espesor (m) | N.A. (m) | Según Popov (1959) | |
|------|--------------------------------|-------------|----------|--------------------|------------|
| | | | | Corte tipo | Δl |
| 1 | Aluvial | 10 | <3 | 12 | 2.3 – 3.9 |
| 2 | Aluvial marino de la Fm. Guane | 5 | | | |

iv) Columna 4

| Capa | CIG | Espesor (m) | N.A. (m) | Según Popov (1959) | |
|------|--|-------------|----------|--------------------|------------|
| | | | | Corte tipo | Δl |
| 1 | Aluvial | 7.5 | <5 | 8 | 1.6 – 2.4 |
| 2 | Eluvios de la Fm. Paso Real o Loma Candela | 5 | | | |
| 2 | Rocas de la Fm. Paso Real o Loma Candela | 2,5 | | | |

v) Columna 5

| Capa | CIG | Espesor (m) | N.A. (m) | Según Popov (1959) | |
|------|--------------------------------|-------------|----------|--------------------|------------|
| | | | | Corte tipo | Δl |
| 1 | Aluvial marino de la Fm. Guane | 5 | <5 | 8 | 1.6 – 2.4 |
| 2 | Eluvios de la Fm. Paso Real | 10 | | | |

vi) Columna 6

| Capa | CIG | Espesor (m) | N.A. (m) | Según Popov (1959) | |
|------|--------------------------------|-------------|----------|--------------------|------------|
| | | | | Corte tipo | Δl |
| 1 | Aluvial marino de la Fm. Guane | 7.5 | <8 | 8 | 1.6 – 2.4 |
| 2 | Eluvios de la Fm. Paso Real | 7.5 | | | |

vii) Columna 7

| Capa | CIG | Espesor (m) | N.A. (m) | Según Popov (1959) | |
|------|--------------------------------|-------------|----------|--------------------|------------|
| | | | | Corte tipo | ΔI |
| 1 | Aluvial marino de la Fm. Guane | 10 | <5 | 8 | 1.6 – 2.4 |
| 2 | Eluvios de la Fm. Paso Real | 5 | | | |

viii) Columna 8

| Capa | CIG | Espesor (m) | N.A. (m) | Según Popov (1959) | |
|------|--------------------------------|-------------|----------|--------------------|------------|
| | | | | Corte tipo | ΔI |
| 1 | Aluvial marino de la Fm. Guane | 15 | <5 | 8 | 1.6 – 2.4 |

ix) Columna 9

| Capa | CIG | Espesor (m) | N.A. (m) | Según Popov (1959) | |
|------|---|-------------|----------|--------------------|------------|
| | | | | Corte tipo | ΔI |
| 1 | Eluvios de la Fm. Paso Real o de Loma Candela | 3 | >10 | 5 | 1.0 – 2.0 |
| 2 | Rocas de la Fm. Paso Real o Loma Candela | 12 | | | |

Se identificaron cortes de los tipos 5, 8 y 12. El más peligroso desde el punto de vista sísmico corresponde al corte tipo 12, representado por espesores potentes (10 m) de suelos aluviales saturados en la cercanía de los cauces fluviales, donde pueden ocurrir incrementos de la intensidad sísmica superiores a 2.5 grados.

El corte tipo de más amplia distribución (70% del área) se caracteriza por una secuencia de suelos friables hasta la profundidad máxima de estudio de 15 m, pertenecientes a los complejos aluvial, aluvial marino y eluvial, con nivel freático que no excede los 5 m desde la superficie del terreno (corte tipo 8). Se pueden manifestar, según Popov, incrementos de la intensidad sísmica de 1.6 a 2.4 respecto al patrón de rocas graníticas. El de menor peligro desde el punto de vista sísmico corresponde a suelos semirrocosos y rocosos de las formaciones Paso Real y Loma Candela, donde el incremento oscila de 1.0 a 2.0 grados (corte tipo 5).

En el anexo VII se muestra el mapa de incremento de la intensidad sísmica respecto a la roca granítica para el pueblo de San Cristóbal y áreas aledañas, mediante el método de analogías ingeniero geológicas.

IV.2. Zonación del incremento de la intensidad sísmica respecto a la roca granítica.

Método de rigidez sísmica.

En el epígrafe III.2.2 se expuso detalladamente la metodología seguida para la obtención del incremento de la intensidad sísmica por el método de rigidez sísmica. Durante el procedimiento de cálculo se utilizaron tablas en Microsoft Excel, lo que permitió el tratamiento rápido y sencillo de un gran número de datos. Se confeccionaron tres tablas básicas:

- Conversión de las velocidades de ondas longitudinales a transversales por la fórmula enumerada en Gurvich (1972).
- Cálculo de la velocidad transversal para un corte multicapa por el método de capa equivalente (Masuda et al., 1979).
- Cálculo del incremento de la intensidad sísmica por la fórmula de Medvedev (1973).

Otra de las ventajas en la utilización de la plataforma Excel es la posibilidad de actualización permanente de los datos, sobre todo la información referente a espesores de las diferentes capas del corte, densidad promedio de los complejos ingeniero geológicos y velocidad de las ondas sísmicas. Los parámetros mencionados son susceptibles a cambios en la medida que aumente el grado de estudio ingeniero geológico y geofísico. A continuación, se muestran los resultados de la aplicación de dicha metodología.

Aplicando la fórmula propuesta en Gurvich (1972), se transforman los valores de velocidades longitudinales (V_p) a transversales (V_s), mostrándose los resultados en la tabla IV.1.

$$V_s = \sqrt{\frac{(1-2\nu)}{2(1-\nu)}} * V_p$$

donde ν es el coeficiente de Poisson del suelo o roca.

Los valores de la velocidad de las ondas longitudinales se tomaron de mediciones efectuadas en suelos de igual génesis y parecidas condiciones de humedad, durante el estudio de una obra hidráulica en el municipio de Consolación del Sur (Bustio, 1988). A su vez, los correspondientes valores del coeficiente de Poisson (ν) se extrajeron de Gurvich (1972).

Tabla IV.1. Velocidad de las ondas sísmicas transversales, para cada uno de los complejos ingeniero geológicos definidos en el pueblo de San Cristóbal y áreas aledañas.

| CIG | Vp (m/s) | v | Vs (m/s) |
|----------------------------|---------------------|----------|---------------------|
| Aluvial | 200 | 0.20 | 125 |
| Aluvial Marino | 425 | 0.35 | 200 |
| Eluvio de la Fm. P. Real | 750 | 0.30 | 400 |
| Eluvio de la Fm L. Candela | 750 | 0.30 | 400 |
| Roca Fm. P. Real | 2000 | 0.30 | 1070 |
| Roca Fm. L. Candela | 2500 | 0.30 | 1340 |

Lomtdze (1977) establece una serie de rangos de Vs para diferentes tipos de rocas (tabla IV.2). Obsérvese como los valores de obtenidos por la propuesta de Gurvich están dentro de los rangos citados.

Tabla IV.2. Correlación entre los valores de velocidades transversales propuestos por Lomtdze (1977) y los determinados para los diferentes complejos ingeniero geológicos en el pueblo de San Cristóbal y áreas aledañas.

| C.I.G. definidos en San Cristóbal según Ordaz et al. (2009) | Tipo de roca según Lomtdze (1977) | Vs (m/s) | |
|--|--|---------------------|------|
| Aluvial | IV | 100-700* | 125 |
| Aluvial Marino | V | 200-700* | 200 |
| Eluvio de la Fm. P. Real | III | 360-500* | 400 |
| Eluvio de la Fm. L. Candela | | | 400 |
| Roca Fm. P. Real | II | 400-3400* | 1070 |
| Roca Fm. L. Candela | | 1100-2000* | 1340 |

*Valores tomados de Lomtdze (1977).

Conocidos los valores de la velocidad de las ondas transversales (tabla IV.1) para cada complejo ingeniero geológico (CIG); se determina la velocidad equivalente para cada corte ingeniero geológico típico (tabla IV.3).

Tabla IV.3. Tabla para determinar la velocidad equivalente de cada uno de los cortes ingeniero geológicos por el método de Masuda et al. (1979).

| Corte litológico | V ₁ (m/s) | V ₂ (m/s) | V ₃ (m/s) | h ₁ (m) | h ₂ (m) | h ₃ (m) | V ₁₋₂ (m/s) | V ₁₋₃ (m/s) |
|------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|---------------------------|---------------------------|
| 1 | 125 | 400 | - | 5 | 15 | - | 231 | - |
| 2 | 125 | 200 | 400 | 5 | 12.5 | 15 | 161 | 179 |
| 3 | 125 | 200 | - | 10 | 15 | - | 143 | - |
| 4 | 125 | 400 | 1070 | 7.5 | 12.5 | 15 | 172 | 200 |
| 5 | 200 | 400 | - | 5 | 15 | - | 300 | - |
| 6 | 200 | 400 | - | 7.5 | 15 | - | 267 | - |
| 7 | 200 | 400 | - | 10 | 15 | - | 240 | - |
| 8 | 200 | - | - | 15 | - | - | 200 | - |
| 9 | 400 | 1070 | - | 3 | 15 | - | 801 | - |

V₁, V₂ y V₃: velocidad de las ondas transversales en la primera, segunda y tercera capas,

h₁, h₂ y h₃: espesor de la primera, segunda y tercera capas,

V₁₋₂: velocidad equivalente para las capas 1 y 2s

V₁₋₃: velocidad equivalente para todo el corte estudiado (15 m desde la superficie).

Finalmente, aplicando la ecuación $\Delta I = 1.67 \log \rho_0 V_0 / \rho_i V_i$ y considerando $\rho_0 V_0 = 9361$ (dureza sísmica del granito), se obtiene, para cada uno de los cortes litológicos definidos anteriormente, el valor del incremento de la intensidad sísmica (ΔI) respecto a la roca granítica (tabla IV.4).

Tabla IV.4. Hoja de cálculo para determinar ΔI por el método de rigidez sísmica.

| Corte litológico | h ₁ (m) | h ₂ (m) | h ₃ (m) | ρ_1 (g/cm ³) | ρ_2 (g/cm ³) | ρ_3 (g/cm ³) | ρ_i (g/cm ³) | V _i (m/s) | $\rho_i \cdot V_i$ | ΔI |
|------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|-------------------------|--------------------|------------|
| 1 | 5 | 10 | - | 2.00 | 2.04 | - | 2.03 | 231 | 468.16 | 2.5 |
| 2 | 5 | 7.5 | 2.5 | 2.00 | 2.04 | 2.04 | 2.03 | 179 | 362.77 | 2.4 |
| 3 | 10 | 5 | - | 2.00 | 2.04 | - | 2.01 | 143 | 287.91 | 2.5 |
| 4 | 7.5 | 5 | 2.5 | 2.00 | 2.04 | 2.25 | 2.06 | 200 | 411.00 | 2.3 |
| 5 | 5 | 10 | - | 2.04 | 2.04 | - | 2.04 | 300 | 612.00 | 2.0 |
| 6 | 7.5 | 7.5 | - | 2.04 | 2.04 | - | 2.04 | 267 | 544.68 | 2.1 |
| 7 | 10 | 5 | - | 2.04 | 2.04 | - | 2.04 | 240 | 489.60 | 2.1 |
| 8 | 15 | - | - | 2.04 | - | - | 2.04 | 200 | 408.00 | 2.3 |
| 9 | 3 | 12 | - | 2.04 | 2.25 | - | 2.21 | 801 | 1768.61 | 1.2 |

h₁, h₂ y h₃: Espesor de la primera, segunda y tercera capas,

ρ_1 , ρ_2 y ρ_3 : Densidad natural de la primera, segunda y tercera capas,

ρ_i : Densidad natural ponderada para el corte,

V_i: Velocidad equivalente de las ondas transversales para el corte,

ΔI : Incremento de la intensidad sísmica respecto a la roca granítica.

En el anexo VIII se muestra el mapa de incremento de la intensidad sísmica respecto a la roca granítica, obtenido por el método de rigidez sísmica. Según los resultados de la tabla IV.4, el corte litológico 9 es el de menor incremento de intensidad sísmica (1.2 grados). Este perfil se caracteriza por la presencia de eluvios de las formaciones Paso Real o Loma Candela, subyacidos por las rocas de estas mismas formaciones.

Los cortes litológicos 1, 2 y 3 experimentarían los mayores incrementos, entre 2.4 y 2.5 grados. Estos cortes se conforman por espesores variables entre 5 y 10 m de sedimentos aluviales poco consolidados, generalmente saturados de agua. Por este método, aproximadamente para el 70% de la superficie del pueblo de San Cristóbal y áreas aledañas, se obtuvo un incremento de la intensidad sísmica entre 2.0 y 2.3 grados.

A modo de validación, en la tabla IV.5 se comparan, para cada uno de los cortes litológicos, los valores de ΔI obtenidos por los métodos de rigidez sísmica y de analogías ingeniero geológicas.

Tabla IV.5. Comparación entre los ΔI obtenidos por el método de analogías ingeniero geológicas (método cualitativo) y el método de rigidez acústica (método cuantitativo).

| Corte litológico | Incremento de intensidad sísmica (ΔI) | |
|------------------|---|----------------------------|
| | Método de analogías ingeniero geológicas | Método de rigidez acústica |
| 1 | 1.6 – 2.4 | 2.2 |
| 2 | 1.6 – 2.4 | 2.4 |
| 3 | 2.3 – 3.9 | 2.5 |
| 4 | 1.6 – 2.4 | 2.3 |
| 5 | 1.6 – 2.4 | 2.0 |
| 6 | 1.6 – 2.4 | 2.1 |
| 7 | 1.6 – 2.4 | 2.1 |
| 8 | 1.6 – 2.4 | 2.3 |
| 9 | 1.0 – 2.0 | 1.2 |

Los valores obtenidos por ambos métodos se asemejan. El método de rigidez acústica tiene la ventaja de restringir los rangos de variación; debido a la utilización en sus cálculos de parámetros geotécnicos y velocidades de ondas que caracterizan mejor los suelos estudiados.

IV.3. Zonación de la respuesta sísmica de los suelos en función del coeficiente de amplificación del terreno.

Este método, de mayor sencillez en su aplicación que los anteriores, se propone para realizar evaluaciones preliminares de la influencia de las condiciones ingeniero geológicas en la respuesta sísmica local. El coeficiente de amplificación depende solo de la clasificación sísmica de los suelos establecida en la normativa de cálculo sismorresistente correspondiente, en este caso la Norma de Construcción Sismorresistente de España NCSE-02.

Para ello, se establece la correlación entre las categorías sísmicas de los suelos descritos en la Norma Cubana NC 46: 1999 y en la Norma de Construcción Sismorresistente de España NCSE-02, obteniéndose de esta última el coeficiente de amplificación del terreno C para cada uno de los tipos de suelos descritos, tal como se refirió anteriormente en el epígrafe III.2.3. y anexo VI.

A continuación, se muestran las 9 columnas generalizadas representativas para el pueblo de San Cristóbal y áreas aledañas, con las categorías sísmicas de los suelos según ambas normas y los valores del coeficiente C tomados de la normativa española.

i) Columna 1

| Capa | CIG | Espesor (m) | Categoría de suelo según NC 46: 1999 | Tipo de terreno según NCSE-02 | Coeficiente C | Valor medio ponderado de C |
|------|-----------------------------|-------------|--------------------------------------|-------------------------------|---------------|----------------------------|
| 1 | Aluvial | 5 | S3 | IV | 2.0 | 1.7 |
| 2 | Eluvios de la Fm. Paso Real | 10 | S2 | III | 1.6 | |

ii) Columna 2

| Capa | CIG | Espesor (m) | Categoría de suelo según NC 46: 1999 | Tipo de terreno según NCSE-02 | Coeficiente C | Valor medio ponderado de C |
|------|-------------------------------|-------------|--------------------------------------|-------------------------------|---------------|----------------------------|
| 1 | Aluvial | 5 | S3 | IV | 2.0 | 1.7 |
| 2 | Aluvial marino de la Fm Guane | 7.5 | S2 | III | 1.6 | |
| 3 | Eluvios de la Fm. Paso Real | 2.5 | S2 | III | 1.6 | |

iii) Columna 3

| Capa | CIG | Espesor (m) | Categoría de suelo según NC 46: 1999 | Tipo de terreno según NCSE-02 | Coefficiente C | Valor medio ponderado de C |
|------|--------------------------------|-------------|--------------------------------------|-------------------------------|----------------|----------------------------|
| 1 | Aluvial | 10 | S3 | IV | 2.0 | 1.9 |
| 2 | Aluvial marino de la Fm. Guane | 5 | S2 | III | 1.6 | |

iv) Columna 4

| Capa | CIG | Espesor (m) | Categoría de suelo según NC 46: 1999 | Tipo de terreno según NCSE-02 | Coefficiente C | Valor medio ponderado de C |
|------|--|-------------|--------------------------------------|-------------------------------|----------------|----------------------------|
| 1 | Aluvial | 7.5 | S3 | IV | 2.0 | 1.8 |
| 2 | Eluvios de la Fm. Paso Real o Loma Candela | 5 | S2 | III | 1.6 | |
| 3 | Rocas de la Fm. Paso Real o Loma Candela | 2.5 | S1 | II | 1.3 | |

v) Columna 5

| Capa | CIG | Espesor (m) | Categoría de suelo según NC 46: 1999 | Tipo de terreno según NCSE-02 | Coefficiente C | Valor medio ponderado de C |
|------|--------------------------------|-------------|--------------------------------------|-------------------------------|----------------|----------------------------|
| 1 | Aluvial marino de la Fm. Guane | 5 | S2 | III | 1.6 | 1.6 |
| 2 | Eluvios de la Fm. Paso Real | 10 | S2 | III | 1.6 | |

vi) Columna 6

| Capa | CIG | Espesor (m) | Categoría de suelo según NC 46: 1999 | Tipo de terreno según NCSE-02 | Coefficiente C | Valor medio ponderado de C |
|------|--------------------------------|-------------|--------------------------------------|-------------------------------|----------------|----------------------------|
| 1 | Aluvial marino de la Fm. Guane | 7.5 | S2 | III | 1.6 | 1.6 |
| 2 | Eluvios de la Fm. Paso Real | 7.5 | S2 | III | 1.6 | |

vii) Columna 7

| Capa | CIG | Espesor (m) | Categoría de suelo según NC 46: 1999 | Tipo de terreno según NCSE-02 | Coefficiente C | Valor medio ponderado de C |
|------|--------------------------------|-------------|--------------------------------------|-------------------------------|----------------|----------------------------|
| 1 | Aluvial marino de la Fm. Guane | 10 | S2 | III | 1.6 | 1.6 |
| 2 | Eluvios de la Fm. Paso Real | 5 | S2 | III | 1.6 | |

viii) Columna 8

| Capa | CIG | Espesor (m) | Categoría de suelo según NC 46: 1999 | Tipo de terreno según NCSE-02 | Coefficiente C | Valor medio ponderado de C |
|------|--------------------------------|-------------|--------------------------------------|-------------------------------|----------------|----------------------------|
| 1 | Aluvial marino de la Fm. Guane | 15 | S2 | III | 1.6 | 1.6 |

ix) Columna 9

| Capa | CIG | Espesor (m) | Categoría de suelo según NC 46: 1999 | Tipo de terreno según NCSE-02 | Coefficiente C | Valor medio ponderado de C |
|------|---|-------------|--------------------------------------|-------------------------------|----------------|----------------------------|
| 1 | Eluvios de la Fm. Paso Real o eluvios-deluvios de la Fm. Loma Candela | 3 | S2 | III | 1.6 | 1.4 |
| 2 | Rocas de la Fm. Paso Real o Loma Candela | 12 | S1 | II | 1.3 | |

Los valores del coeficiente de amplificación del terreno C están comprendidos entre 1.4 y 1.9. El mayor valor (1.9) corresponde al corte 3, representado por un espesor de 10 m aproximadamente de suelos aluviales que sobreyacen a los depósitos aluvial marinos de la Formación Guane. El sector representado por este corte experimentaría los mayores efectos de amplificación de la intensidad sísmica (anexo IX).

Las zonas de mayor coeficiente de amplificación guardan una relación espacial satisfactoria con las de mayor incremento de intensidad sísmica definida por los métodos anteriores.

IV.4. Relación espacial entre la infraestructura socioeconómica y la peligrosidad sísmica local

En este epígrafe se muestra la relación espacial entre las diferentes zonas de peligrosidad sísmica local cartografiadas y la infraestructura socioeconómica del área, lo que aporta criterios para evaluar las pérdidas o daños que pudieran producirse como consecuencia de los terremotos. A la vez, pueden servir de base a estudios más profundos que incluyan análisis de vulnerabilidad de estructuras e instalaciones, estimación de riesgos y elaboración de planes de prevención y manejo de desastres.

El concepto de ***peligrosidad*** es frecuentemente utilizado en la literatura especializada sobre riesgos geológicos (Varnes 1984; Barbat, 1998; González de Vallejo, 2002). Para su evaluación es necesario conocer:

- Dónde y cuándo ocurrieron los procesos en el pasado.
- La intensidad y magnitud que tuvieron.
- Las zonas en que pueden ocurrir procesos futuros.
- La frecuencia de ocurrencia.

Para este caso de estudio, el mapa de peligrosidad sísmica local (anexo X) representa una zonificación de suelos y rocas con diferentes niveles de respuesta sísmica. La peligrosidad fue clasificada en alta, media y baja (tabla IV.2), tomándose en cuenta para ello dos criterios que se complementan:

- Incremento de la intensidad sísmica (ΔI) respecto a la roca granítica por el método de rigidez sísmica.
- Comportamiento del coeficiente de amplificación del terreno C.

Tabla IV.2. Niveles de peligrosidad sísmica para el pueblo de San Cristóbal y áreas aledañas.

| Peligrosidad sísmica local | ΔI (grados) | Coficiente de amplificación C |
|----------------------------|------------------------|----------------------------------|
| Alta | 2.5 | Mayor que 1.8 |
| Media | 2.0 – 2.4 | 1.6 – 1.8 |
| Baja | 1.2 | Menor que 1.6 |

Se consideran zonas de peligrosidad sísmica local alta aquellas áreas con suelos que experimenten incrementos de la intensidad sísmica superiores a 2.5 grados y estén caracterizadas por un coeficiente de amplificación mayor que 1.8. Las mismas se

correlacionan en el territorio estudiado con un perfil de suelos formado por arenas de origen aluvial, un contenido de finos (arcilla y limos) del 25% aproximadamente, casi siempre saturadas con agua y subyacidas a menudo, dentro del espesor considerado de 15 m, por sedimentos aluvial marinos. Desde el punto de vista constructivo, son sectores poco favorables para emplazar edificaciones, siendo atravesados con frecuencia por obras lineales (carreteras, líneas férreas, redes técnicas), resultando, además, sitios de emplazamiento de puentes. Todas estas líneas vitales y estructuras son muy vulnerables a los sismos.

Las zonas de peligrosidad sísmica media coinciden, generalmente, con depósitos aluvial marinos de la Formación Guane, con espesores variables entre 5 y 15 m, representados por arenas arcillosas y arcillas inorgánicas de baja o alta plasticidad. Sus características constructivas resultan favorables para la ubicación, en la generalidad de los casos, de obras de diferente complejidad.

A su vez, los sectores de peligrosidad sísmica baja corresponden a los perfiles conformados desde el punto de vista litológico por eluvios de las formaciones Paso Real o Loma de Candela, donde el techo de la roca puede oscilar entre 3 y 12 m. Constituye un sector favorable para el emplazamiento de todo tipo de construcciones.

En el anexo X se presenta el mapa de peligrosidad sísmica local, sobre el que se ha superpuesto la infraestructura socioeconómica existente en el área de estudio, representada por los siguientes elementos principales: instalaciones de salud pública y educación, industrias, líneas eléctricas (13, 33, 110 y 220 kV), subestaciones eléctricas, viales y dique del embalse La Paila.

Resulta destacable que casi el 100% de la infraestructura actualmente construida coincide con el sector de peligrosidad sísmica media, donde las condiciones del suelo pueden originar un incremento de 2.0 a 2.4 grados de intensidad macrosísmica en relación con los efectos producidos en un suelo rocoso duro.

En caso de ocurrencia de un evento sísmico similar al de 130 años atrás (magnitud 5.9 en la escala de Richter), una estimación preliminar de la intensidad de los daños producidos en esta zona puede cuantificarse entre 7-8 grados MSK, lo que significa que pueden ser moderados y algunos graves en construcciones de tipología I, moderados a graves en edificaciones de tipología II, y muy graves hasta provocar el colapso, en edificaciones de las restantes tipologías constructivas.

Un elemento constructivo que requiere un análisis especial es el dique del embalse La Paila, cuya destrucción total o parcial de forma súbita pudiera ocasionar un gran impacto sobre el núcleo urbano de San Cristóbal, situado apenas a 1.5 km aguas abajo. No obstante, un factor atenuante resulta la mayor flexibilidad ante los movimientos del suelo que presentan las presas de tierra en relación con las construidas de materiales que presentan un comportamiento rígido.

Por último, debe enfatizarse en la necesidad imperiosa de llevar a cabo investigaciones sismológicas especiales en el territorio con el fin de precisar la peligrosidad sísmica regional para diferentes períodos de recurrencia, la cual debe servir de base para la realización de estudios de vulnerabilidad y riesgo, que permitan estimar el nivel de pérdidas humanas y materiales que pudieran ocasionar eventos sísmicos de diferentes magnitudes.

Al mismo tiempo, los resultados de dichos estudios son el punto de partida para la preparación de planes de reducción de desastres ante eventos sísmicos, como vía para disminuir la vulnerabilidad ante estos fenómenos naturales.

CONCLUSIONES

1. En Cuba y otros países se aplican diferentes procedimientos para la determinación de la respuesta del suelo ante eventos sísmicos, resultando los más precisos y costosos los que incluyen la realización de mediciones instrumentales de parámetros sísmicos. En la presente investigación, los métodos aplicados se basaron en la utilización de la información ingeniero geológica disponible, lo que permitió obtener una valoración confiable de la respuesta del suelo ante sismos.
2. La falla Pinar constituye la principal estructura sismogeneradora del territorio. Relacionando su posición y buzamiento con la ubicación del epicentro del terremoto de enero de 1880, el más fuerte sentido en Cuba occidental, fijado al sur de dicha falla, se infiere la posible ubicación de futuros focos de terremotos en esa misma dirección, con el consiguiente acercamiento al área de estudio.
3. Mediante la aplicación del método de analogías ingeniero geológicas, se definió un incremento de intensidad sísmica (ΔI) de hasta 3.9 grados respecto a la roca granítica en algunos sectores de San Cristóbal. Para el sector con mayor densidad poblacional y de infraestructura se pronostica por este método un ΔI entre 1.6 y 2.4 grados.
4. El método de rigidez acústica permite mayor precisión en la determinación del incremento de la intensidad sísmica al tener en cuenta las propiedades de los suelos estudiados. Según este método, se pronostica un ΔI máximo de hasta 2.5 grados y, en el sector de mayor desarrollo socioeconómico, entre 2 y 2.4 grados.
5. Los valores del coeficiente de amplificación del terreno C están comprendidos entre 1.4 y 1.9, obteniéndose una coincidencia satisfactoria en la zonación realizada por este método con la obtenida por los dos métodos anteriormente referidos.
6. Se obtuvo por primera vez un mapa de peligrosidad sísmica del área de estudio integrando los resultados de dos métodos, quedando dividido el territorio estudiado en tres zonas de peligrosidad (alta, media y baja), de acuerdo al efecto amplificador de los suelos ante un sismo.
7. En caso de ocurrencia de un evento sísmico similar al de 1880 (magnitud 5.9 en la escala de Richter), la intensidad esperada en la zona de peligrosidad media se estima alcance entre 7-8 grados MSK, produciendo daños en edificaciones que varían de moderados a muy graves, en dependencia de la tipología constructiva y estado técnico.

RECOMENDACIONES

A partir de los resultados de esta tesis y los trabajos consultados que tratan la temática, quedan demostradas las potencialidades sísmicas del territorio, por lo que se recomienda:

1. Utilizar la cartografía resultante de este trabajo en el planeamiento urbano y durante la elaboración de planes de defensa civil ante sismos.
2. Realizar la evaluación de vulnerabilidad y riesgo geológico en el área de estudio.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Álvarez, L. (1983). "Estimación de la peligrosidad sísmica para la ciudad de Santiago de Cuba". Investigaciones Sismológicas en Cuba, No. 4, pp. 87-123. La Habana.
- Astroza, M. y Monge, J. (1991). "Regional Seismic Zonation en Central Chile". 4th Internacional Conference on Seismic Zonation, 3, pp 487 – 494.
- Barbat, A. H. (1998). "El riesgo sísmico en el diseño de edificios. Cuadernos Técnicos 3. Calidad Siderúrgica. Madrid.
- Borchert, R. D. y Gibas, J.F. (1976). "Effects of local geological condition in the San Francisco bay region on ground motions and the intensities of the 1906 earthquake". Bull. Seism. Soc. Am., 66, pp 497 – 500. U.S.
- Borchet, R. D., Gibbs, J.F. y Lajoie, K. R. (1975). "Maps showing maximum earthquake intensity predicted for large earthquake on the San Andres and Hayward Faults". U.S. Geological Survey Misc. Field Studies Map MF – 709, Scale 1:125 000. U.S.
- Borchet, R.D., Wentworth, C.M., Janssen, A., Fumal, T. y Gibbs, J. (1991). "Methodology for Predictive GIS Mapping of Special Study Zones for Strong Ground Shaking in the San Francisco Bay Region". 4th International Conference on Seismic Zonation, pp 545-552. California.
- Bustio, L.C. (1988). "Informe ingeniero geológico del complejo hidráulico Río Hondo". Archivo técnico, ENIA. Pinar del Río.
- Chuy, T. J. y González, B. E. (1982). "Estimación de la peligrosidad sísmica del área de ubicación de la refinería de Cienfuegos". Investigaciones Sismológicas en Cuba No.2, La Habana.
- Chuy, T. J., González, B. E. y Álvarez, L. (1983). "Sobre la peligrosidad sísmica de Cuba". Investigaciones Sismológicas en Cuba, No. 4, pp. 20-45. La Habana.
- Chuy, T. J. y Álvarez, L. (1995). "Mapa de Peligro Sísmico de Cuba para la nueva Norma Sísmica de la República de Cuba". Ministerio de la Construcción, La Habana.
- Chuy, T. J. (1999). "Macrosísmica de Cuba y su utilización en los estimados de Peligrosidad y Microzonación Sísmica". Fondos del Instituto de Geofísica y Astronomía y del Centro Nacional de Investigaciones Sismológicas.
- Chuy, T. J. (2002). "Precisión por zonas de la peligrosidad sísmica de Cuba con fines de su desarrollo sostenible". Memorias II Congreso Cubano de Geofísica, La Habana.

- Chuy, T. J. y Zapata, J. A. (2005). "Consideraciones sobre el comportamiento reciente de la sismicidad de Cuba". Memorias del Taller Provincial de Geociencias y Química aplicadas a la Construcción. Santiago de Cuba.
- Chuy, T. J. (2005). "Valoración de potenciales impactos de fenómenos naturales en Santiago de Cuba como un elemento imprescindible para el desarrollo sostenible." Memorias del Taller Provincial de Geociencias y Química aplicadas a la Construcción. Santiago de Cuba.
- Cobiella, J. L. (2007). Apuntes de Geología de Cuba. Texto del Curso de Geología de Cuba. Universidad de Pinar del Río.
- Cofiño, C. E. y Cáceres, D. (2003). "Efectividad de la utilización de métodos microtectónicos en el desciframiento de la evolución de estructuras tectónicas (falla Pinar)". Minería y Geología 19 (3): art. 4.
- Crone, A. J., Machette, M. N. y Browman, J. R. (1992). "Geologic investigations of the Tennat Creek, Australia. Earthquake. implications for paleoseismicity in stable continental regions." U. S. Geol. Sur. Bull., 2032-A, pp.1-51.
- Díaz Duque, J. A., Azze Pavón, A. B., Díaz O, Casarreal, G. (1987). "Utilización del Gradiente Total Normal de la Gravedad en el Estudio de la Estructura Profunda de la provincia de Pinar del Río". Minería y Geología Vol 5 N° 3, pp. 45-50.
- Díaz, J. L., Portela, H. A., Blanco, P. y Magaz, A. (1986). "Los principios básicos de la clasificación morfoestructural del relieve cubano". Academia de Ciencias de Cuba., Instituto de Geografía. La Habana.
- Dowrick, D. J. (2000). Eartquake resistant design. 2nd Ed. John & Sons, London.
- Everden, J.F., Kohler, W.M. y Cloe, G.D. (1981). "Seismic intensities of earthquake of Conterminous United Status: Their prediction and interpretation. U.S.G.S.". Professional Paper 1223, 56 pp. U. S.
- Franco, A. (1994): Léxico estratigráfico de Cuba. Instituto de Geología y Paleontología. La Habana.
- Furrazola Bermúdez, G., Judoley, C. M. et al. (1964). Geología de Cuba. Editorial Nacional de Cuba. La Habana.
- García, J., Slejko, D., Álvarez, L., Peruzza, L. y Rebez, A. (2003). "Seismic Hazard Maps for Cuba and Surrounding Areas". Bull. Seism. Soc. Am. 93, pp. 2563-2590.
- González, N., Ramos, G. y Romero, Z. (2001). "Las obras hidrotécnicas y su influencia en el régimen de las aguas subterráneas: Caso de estudio en la provincia de Pinar

- del Río, Cuba”. Memorias del III Congreso Internacional sobre Ingeniería Hidráulica. La Habana.
- González de Vallejo, L. I. (2002). Ingeniería Geológica. Ed. Pearson Educación, Madrid.
- Gonzalez, B. E., Mirzoev, K., Chuy, T. J., Golubiatnikov, V., Lyskov, L., Zapata, J. A., Álvarez, H. (1989). “Microzonificación sísmica de la ciudad de Santiago de Cuba”. Comunicaciones Científicas sobre Geofísica y Astronomía No. 15, p. 15. Inst.de Geofísica y Astronomía, Academia de Ciencias de Cuba, La Habana.
- Gonzalez, B. E., Mirzoev, K., Chuy, T. J., Golubiatnikov, V., Lyskov, L., Zapata, J. A., Álvarez, H. (1984). “Informe Final del Tema 31002 Estudio del Riesgo Sísmico y de la Variación de la Intensidad Sísmica de los Terremotos en el Territorio de la Ciudad de Santiago de Cuba”. Archivos del CENAIIS, 150 pp. Santiago de Cuba.
- González, B. y Pérez, L. (2005). “Escenarios de peligro sísmico y de fenómenos geotécnicos asociados en municipios urbanos de Ciudad de La Habana”. Memorias del 2do. Taller de Mitigación y Prevención de Desastres. UNAICC, Santiago de Cuba.
- González, B. E. (1991). “Estimación del Efecto Sísmico en la Ciudad de Santiago de Cuba”. Tesis doctoral en Ciencias Físico Matemáticas. Instituto de Geofísica y Astronomía, La Habana.
- González, B. E. y Kogan, L. (1987). “Seismic intensity estimation for the reference soil of the city of Santiago de Cuba”. Results of Research of International Geophysical Projects. Seismological Research No. 10. Moscow.
- González, B. E. (2006). “Utilización de los mapas de microzonificación sísmica en el análisis de la vulnerabilidad y la evaluación del riesgo sísmico de áreas urbanas en Cuba”. Revista de la Fac. de Ingeniería, Univ. Central de Venezuela, Vol.21 No.4, ISSN 0798-4065.Caracas.
- Gordon, M, Mann, P., Cáceres, D. y Flores, R. (1997). “Cenozoic tectonic history of the North American-Caribbean plate boundary zone in western Cuba”. Journal of Geophysical Research Vol. 102: 10055-10082.
- Gurvich, I. (1972). Seismic prospecting. Editorial MIR. Moscú.
- Hatten, C.W. (1957). “Geologic report on Sierra de los Órganos” (Unpubl.). Fondo Geol. MINBAS, La Habana.
- Howell, D., Jones, D., and Schermer, E. (1985). “Tectonostratigraphic terranes of the Circum-Pacific region”. In: D. Howell (Editor), Tectonostratigraphic Terranes of

- the Circum-Pacific. Circum-Pacific Council for Energy and Mineral Resources. Earth Science Series 1, pp. 3-30. Houston, Texas.
- Instituto de Geografía de la Academia de Ciencias de Cuba (1988). Nuevo Atlas Nacional de Cuba. La Habana.
- Iturralde-Vinent, M. (1998): "Sinopsis de la constitución geológica de Cuba". En J. C. Melgarejo y J. A. Proenza.: "Geología y Metalogénia de Cuba, una introducción". Acta Geológica Hispánica v. 33, no. 1-4, pp. 9-56.
- Iturralde-Vinent, M. A. (1994). "Cuban Geology: A new plate tectonic synthesis". Journal of Petroleum Geology, 17 (1), 39-70.
- Iturralde-Vinent, M. (1978). "Los movimientos tectónicos de la etapa de desarrollo platafórmico de Cuba." Acad. Ciencias de Cuba, Informes Científico-Técnicos 20:3-24. La Habana.
- Iturralde-Vinent, M.(2003). "Ensayo sobre la paleogeografía del Cuaternario de Cuba". Memorias del V Congreso de Geología y Minería. La Habana.
- Judoley, C. M. y Furrázola, B. G. (1971). Geología del área del Caribe y de la costa del Golfo de México. La Habana.
- Khudoley, K. M. (1967). "Principal features of Cuba geology." Amer. Assoc. Petrol. Geol. Bull., 51 (5): 668-677, Tulsa.
- Khudoley, K. M. y Meyerhoff, A. A. (1971). "Paleogeography and geological history of Greater Antilles". Geol. Soc. Amer. Mem., 129, 1-199, Boulder.
- Kogan, L. A., Neshaev, V. A., y Romanov, O. A. (1974). Microrregionalización sísmica de Tadshikistan. Edit. Donish, 379 pp. Dushambe URSS.
- Lewis, J. W. (1932). "Geology of Cuba". Amer. Assoc. Petrol. Geol. Bull., 16 (6): 533-555, Tulsa.
- Lewis, J.F., and Draper, G. (1990): "Geology and tectonic evolution of the northern Caribbean margin". In: J.E. Case and G. Dengo (Editors), Decade of North American Geology, Vol. H. The Caribbean Region. Geological Society of America, Boulder, CO, pp. 77-140.
- Liliemberg, D. (1984). Geodinámica contemporánea del sistema montañoso Sierra Maestra. En Polígonos Geodinámicos Complejos, pp. 128-135, Ed. Nauka, Moscú.
- Lomtadze, V. D. (1977): Geología aplicada a la ingeniería geodinámica. Editorial Pueblo y Educación. La Habana.

- Macau, A. R. (2008). "Microzonación sísmica. Contribución a los estudios de peligrosidad sísmica a escala local en zonas rurales y urbanas." Tesis en opción al grado de Doctor en Ciencias. Universidad Politécnica de Catalunya, Barcelona.
- Martínez, D., Vázquez, M, Chang, J.C., Denis, R., Fernández, O., Fernández de Lara, R., Barrios, E. (1994). "Generalización del mapa geológico a escala 1:100 000 del Occidente de Cuba". IGP. La Habana.
- Martínez, D. y Fernández de Lara, R. (1988). "Informe sobre los trabajos del levantamiento geológico y búsqueda acompañante a escala 1: 50 000 en la parte central de la provincia de Pinar del Río". Inv. 3642. La Habana.
- Masuda H., Asano, G., Ishii Y. (1979). "Planning of seismic refraction prospecting for civil engineering investigations". The Society of Exploration Geophysics of Japan". OYO Corporation, technical note-48. Japan.
- McGillavry, H. J. (1970). "Geological history of the Caribbean". Koninkl. Nederlandse Acad. Wetensch. Proc., ser. B, 73: 64-96.
- Medvedev, S.V. (1965). Ingeniería Sísmica. Moscú.
- Medvedev, S.V. (1977). Microzonación Sísmica. Ed. Nauka, Moscú.
- Medvedev, S.V. (1973). "Recomendaciones para la microregionalización sísmica RMS-73". Serie Cuestiones de Ingeniería Sísmica, vol 15. Moscú.
- Meyerhoff, A. A. y Hatten, C. W. (1968). "Diapiric structures in central Cuba." Am. Assoc. Petr. Geol., 8: 315-357. Tulsa.
- Meyerhoff, A. A. y Hatten, C. W. (1974). "Bahamas salient of North America: tectonic framework, stratigraphic, and petroleum potential." Am. Assoc. Petr. Geol., 58 (6): 1201-1239. Tulsa.
- Ordaz, A., García, J. A. y Hernández, L. (2009). "Esquema ingeniero geológico del pueblo de San Cristóbal a escala 1:25 000". Resultados parciales del proyecto Evaluación del macizo geológico con fines constructivos en la Provincia de Pinar del Río". Universidad de Pinar del Río.
- Passchier, C. W. and Trouw, R. A. J. (1998). Microtectonic. Springer-verlag Berlin Heidelberg. Printed in Germany.
- Pastor, M., Blázquez, R. y Olalla, C. (1983). "Caracterización en laboratorio de las propiedades dinámicas de los suelos". Revista de Obras Públicas, pp. 423-432, Madrid.

- Piotrowska, K. (1976). "Outline of Tectonic of the Pinar del Rio Province (Cuba)". Studia Geological Polonica, Serie des Sciencies de la Terre, Vol. XXIV, pp. 183-191.
- Pietrowska, K. (1987): "Las estructuras de nappes de la Sierra de los Órganos". Contribución a la geología de Pinar del Río. Edit. Cientif. Téc., pp. 163-169. La Habana.
- Popov, V. V. (1959). "Criterios Ingeniero-Geológicos de la Zonación Sísmica Detallada". Sismología Ingenieril No 2, URSS.
- Pszczolkowski, A. et al. (1975). Texto explicativo al Mapa Geológico escala 1: 250000 de la provincia de Pinar del Río". IGP. ACC. La Habana, 1975.
- Pszczolkowski, A. (1994). "Lithostratigraphy of the Mesozoic and Paleogene rocks of Sierra del Rosario, Western of Cuba", in Studia Geologica Polonia, vol. 105, pp.39-64.
- Pujades, Ll. (1987). "Distribución de Q de coda a la Península Ibérica". Tesis doctoral. Facultad de Ciencias Físicas de la Universidad de Barcelona.
- Ramos, G., García, J. A., Sarmiento, J. (1993). "Informe ingeniero geológico Túneles populares San Cristóbal". Archivo ENIA Pinar del Río.
- Rigassi Studer, D. (1963). "Sur le géologie de la Sierra de los Órganos, Cuba". Soc. Fis. Nat. Hist. 16 (2): 339-350. Ginebra.
- Schnekova, Z. y Prochaikova, D. (1981). "Determination of representative intensity values of individual localities". Geophysics, Leipzig, pp 225-238.
- Toppozada, R. T., Bennett, J.H., Borchardt, G., Saul, R. y Davis J. F. (1988). "Planning scenario for a major earthquake on the Newport –Inglewood fault zone". Special Publication No. 102, California Dept. of Conservation – Division of Mines and Geology, Sacramento, California.
- Truitt, P. y Bronnimann, P. (1956). "Geology of Pinar del Río and Isla de Pinos" (Inédito). Fondo Geológico. La Habana.
- Varnes, D. J. (1984). Landslide hazard zonation: a review of principles and prectice. UNESCO.
- Zapata J. A. (1996). "Utilización de variantes metodológicas de microzonificación sísmica en la ciudad de Santiago de Cuba". Tesis en opción al grado de Doctor en Ciencias Geofísicas. Instituto de Geofísica y Astronomía. La Habana.

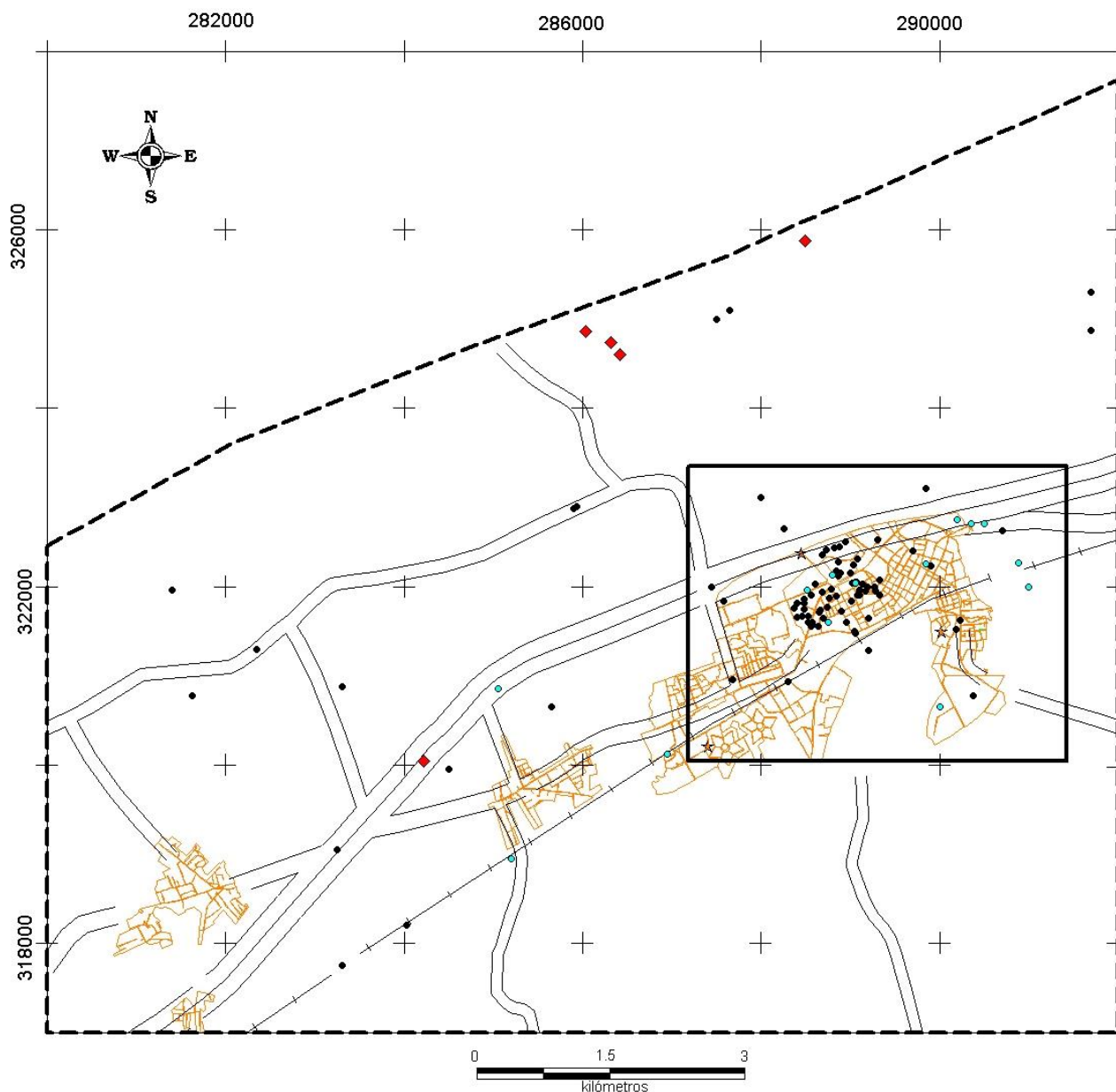
Zapata, J. A. (2005). "Microzonacion sísmica como elemento del planeamiento urbano de ciudades cubanas en zonas sísmicas. Memorias del Taller Provincial de Geociencias y Química aplicadas a la Construcción. Santiago de Cuba.

Anexos

Anexo I. Terremotos fuertes reportados en Cuba.

| AÑO | MES | DIA | HORA | Lat. N. | Lon. W. | Ms | H | I | LOCALIDAD |
|-------------|------------|-----------|--------------|----------------|----------------|--------------|-------------|------------|----------------------|
| 1551 | | | - | (20.40) | (76.60) | (5.8) | (15) | 8.0 | BAYAMO |
| 1578 | AGO | | - | (19.90) | (76.00) | (6.8) | (30) | 8.0 | SANTIAGO DE CUBA |
| 1580 | | | - | (19.90) | (76.00) | (5.8) | (30) | 7.0 | SANTIAGO DE CUBA |
| 1624 | OCT | | - | (20.40) | (76.00) | (5.2) | (15) | 7.0 | BAYAMO |
| 1675 | FEB | 11 | - | (19.90) | (76.00) | (5.8) | (30) | 7.0 | SANTIAGO DE CUBA |
| 1678 | FEB | 11 | 14:59 | (19.90) | (76.00) | (6.8) | (30) | 8.0 | SANTIAGO DE CUBA |
| 1682 | | | - | (19.90) | (76.00) | (5.8) | (30) | 7.0 | SANTIAGO DE CUBA |
| 1752 | OCT | | - | (19.90) | (76.00) | (5.8) | (30) | 7.0 | SANTIAGO DE CUBA |
| 1760 | JUL | 11 | - | (19.90) | (76.00) | (6.8) | (30) | 8.0 | SANTIAGO DE CUBA |
| 1766 | JUN | 12 | 05:14 | (19.80) | (76.10) | (7.6) | (35) | 9.0 | SANTIAGO DE CUBA |
| 1775 | FEB | 11 | - | (19.90) | (76.00) | (5.8) | (30) | 7.0 | SANTIAGO DE CUBA |
| 1826 | SEP | 18 | 09:29 | (19.90) | (76.00) | (5.8) | (30) | 7.0 | SANTIAGO DE CUBA |
| 1842 | JUL | 07 | - | (19.90) | (76.00) | (6.0) | (30) | 7.0 | SANTIAGO DE CUBA |
| 1852 | AGO | 20 | 14:05 | (19.77) | (75.35) | (7.3) | (30) | 9.0 | SANTIAGO DE CUBA |
| 1852 | NOV | 26 | 08:44 | (19.50) | (76.25) | (7.0) | (35) | 8.0 | SANTIAGO DE CUBA |
| 1858 | ENE | 28 | 22:04 | (19.90) | (76.00) | (6.5) | (30) | 7.0 | SANTIAGO DE CUBA |
| 1880 | ENE | 23 | 04:39 | (22.70) | (83.00) | (6.0) | (15) | 8.0 | SAN CRISTOBAL |
| 1903 | SEP | 22 | 08:09 | (19.90) | (76.00) | (5.7) | (30) | 7.0 | SANTIAGO DE CUBA |
| 1906 | JUN | 22 | 07:09 | (19.65) | (76.25) | (6.2) | (30) | 7.0 | SANTIAGO DE CUBA |
| 1914 | FEB | 28 | 05:19 | (21.22) | (76.17) | (6.2) | (32) | 7.0 | GIBARA |
| 1914 | DIC | 25 | 05:19 | (19.45) | (76.30) | (6.7) | (30) | 7.0 | SANTIAGO DE CUBA |
| 1926 | AGO | 03 | 11:30 | (20.30) | (77.10) | (5.4) | (15) | 7.0 | MANZANILLO |
| 1930 | ENE | 17 | 12:00 | (19.90) | (76.00) | (5.8) | (25) | 7.0 | SANTIAGO DE CUBA |
| 1932 | FEB | 03 | 06:15 | 19.80 | 75.80 | 6.75 | - | 8.0 | SANTIAGO DE CUBA |
| 1939 | AGO | 15 | 03:52 | 22.50 | 79.25 | 5.6 | - | 7.0 | REMEDIOS-CAIBARIEN |
| 1947 | AGO | 07 | 00:40 | 19.90 | 75.30 | 6.75 | 50 | 7.0 | SANTIAGO DE CUBA |
| 1976 | FEB | 19 | 13:59 | 19.87 | 76.87 | 5.7 | 15 | 8.0 | PILON |
| 1992 | MAY | 25 | 16:55 | 19.62 | 77.70 | 7.0 | 30 | 7.0 | CABO CRUZ |

Anexo II. Mapa con el grado de estudio. Pueblo de San Cristóbal y áreas aledañas, Cuba. Escala original 1:25 000.

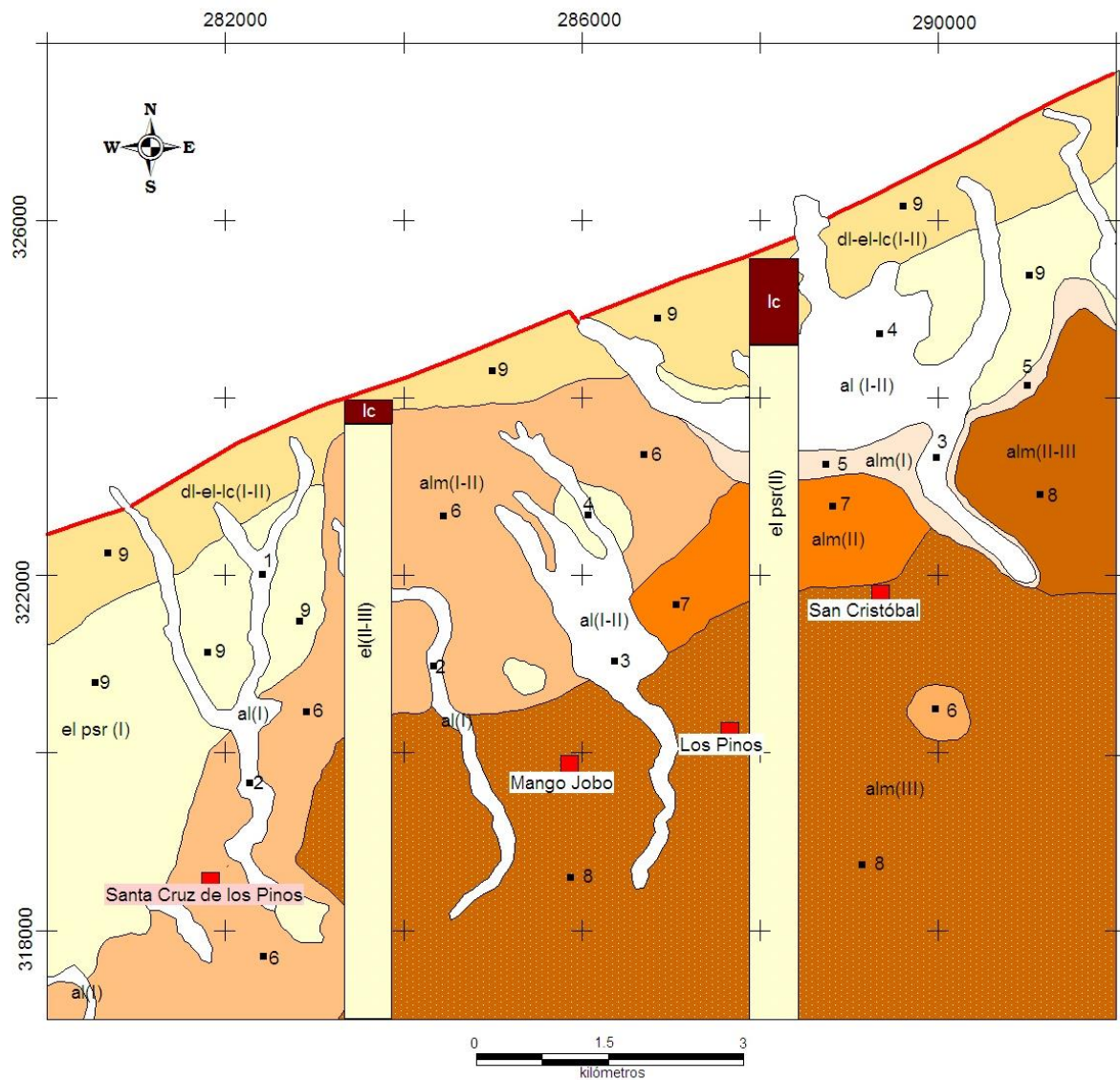


LEYENDA

- Perforaciones
- Perforaciones con niveles de agua en depósitos cuaternarios
- ◆ Puntos con descripción de afloramientos

□ Área con buen grado de estudio.

Anexo III. Esquema ingeniero geológico. Pueblo de San Cristóbal y áreas aledañas, Cuba. Escala original 1:25 000.



LEYENDA

Depósitos aluviales recientes

- al(I). Espesor inferior a 5.0 m.
- al (I-II). Espesor entre 0 y 10.0 m.
- al(I-III). Espesor variable, en ocasiones supera los 10.0 m en ocasiones.

Depósitos aluvial marinos del Plioceno-Cuaternario

- alm(I). Espesor inferior a 5.0 m.
- alm(I-II). Espesor entre 0 y 10.0 m.
- alm(II). Espesor entre 5.0 y 10.0 m.
- alm(II-III). Espesor mínimo de 5.0 m, en ocasiones supera los 10.0 m.
- alm(III). Espesor superior a los 10.0 m.

■ 6 Corte litológico que define el complejo ingeniero geológico.

Depósitos eluviales de la Formación Paso Real

- el psr (I). Espesor inferior a 5.0 m.
- el psr (I-II). Espesor entre 0 y 10.0 m.
- el psr (II). Espesor entre 5.0 y 10.0 m.
- el psr(II-III). Espesor mínimo de 5.0 m, en ocasiones supera los 10.0 m.

Depósitos deluviales y eluviales de la Formación Loma Candela

- dl-el-lc(I-II). Espesor entre 0 y 10.0 m.

Complejo terrígeno-carbonatado del Neógeno

- psr(1). Profundidad del techo inferior a 5.0 m.

Complejo terrígeno del Paleógeno

- lc

Anexo IV. Rangos de variación de los índices físico-mecánicos de los depósitos de cobertura.

| | GRANULOMETRIA | | | | | PLASTICIDAD | | | Gs | COND. NATURALES | | | PARÁM. ASOCIADOS | | | | CORTE DIRECTO | |
|---|---------------|------|-------|-------|------|-------------|-------|------|------|-----------------|----------------|----------------|------------------|-------|-------|----------------|---------------|-------|
| | G | A | L | Ac | F | LL | LP | IP | | w | γ _r | γ _d | e | n | S | I _c | c | ø |
| | % | % | % | % | % | % | % | % | | % | kN/m³ | kN/m³ | - | % | % | - | kPa | grado |
| CIG No. 1: Depósitos aluviales recientes (al) | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| No. de muestras: 20 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Valor máximo | 86 | 73 | 27 | 49 | 68 | 55 | 26 | 36 | 2.75 | 22 | 21.6 | 18.6 | 0.86 | 46 | 98 | 1.22 | 34 | 22 |
| Valor mínimo | 0 | 7 | 0 | 0 | 3 | 27 | 11 | 5 | 2.62 | 13.6 | 18.8 | 14.5 | 0.45 | 31 | 64 | 0.75 | 17 | 2 |
| Valor promedio | 33.3 | 42.1 | 11.9 | 13.3 | 24.9 | 38.4 | 18.8 | 19.7 | 2.70 | 17.94 | 20.00 | 17.07 | 0.59 | 36.7 | 81.4 | 1.00 | 28 | 10.75 |
| CIG No. 2: Depósitos aluvial marinos del Plioceno-Cuaternario (alm) | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| No. de muestras: 38 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Valor máximo | 58 | 66 | 42 | 52 | 79 | 67 | 51 | 48 | 2.88 | 24 | 23.80 | 21.54 | 0.71 | 41.6 | 100 | 1.48 | 70 | 28 |
| Valor mínimo | 0 | 1 | 6 | 0 | 18 | 19 | 9 | 2 | 2.60 | 9 | 19.00 | 15.83 | 0.34 | 25.2 | 40.0 | 0.65 | 7 | 3 |
| Valor promedio | 13.1 | 40.8 | 16.6 | 29.5 | 46.1 | 43.9 | 21.1 | 23.0 | 2.74 | 18.00 | 20.40 | 17.30 | 0.58 | 36.50 | 81.6 | 1.1 | 38.30 | 14.33 |
| CIG No. 3: Depósitos eluviales de la Formación Paso Real (el psr) | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| No. de muestras: 21 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Valor máximo | 80 | 55 | 42 | 88 | 57 | 90 | 25 | 65 | 2.81 | 35.2 | 22.1 | 19.15 | 1.00 | 41.2 | 100.0 | 1.16 | 190 | 25 |
| Valor mínimo | 0 | 8 | 4 | 8 | 0 | 29 | 15 | 9 | 2.66 | 14.3 | 18.34 | 11.7 | 0.42 | 33.0 | 72.6 | 0.75 | 20 | 4 |
| Valor promedio | 21.0 | 33.6 | 15.0 | 30.5 | 45.5 | 48.6 | 19.1 | 24.5 | 2.72 | 20.79 | 20.40 | 16.60 | 0.66 | 37.1 | 90.32 | 1.00 | 110 | 14.5 |
| CIG No. 4: Depósitos deluviales y eluviales de la Formación Loma Candela (dl-el lc) | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| No. de muestras: 6 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Valor máximo | 18 | 59 | 23 | 51 | 67 | 60 | 23 | 37 | 2.73 | 24 | 20.40 | 17.74 | 0.69 | 41 | 94 | 1.00 | 90 | 15 |
| Valor mínimo | 2 | 31 | 3 | 20 | 23 | 23 | 15 | 10 | 2.67 | 15 | 19.80 | 16.00 | 0.51 | 33.6 | 80.0 | 0.70 | 70 | 7 |
| Valor promedio | 9 | 40 | 15.17 | 35.83 | 51 | 43.5 | 18.00 | 25.5 | 2.71 | 18.67 | 20.00 | 16.79 | 0.61 | 37.83 | 82.00 | 0.85 | 80 | 11 |

Anexo V. Método de categorías por perfiles geológicos típicos (Popov, 1959).

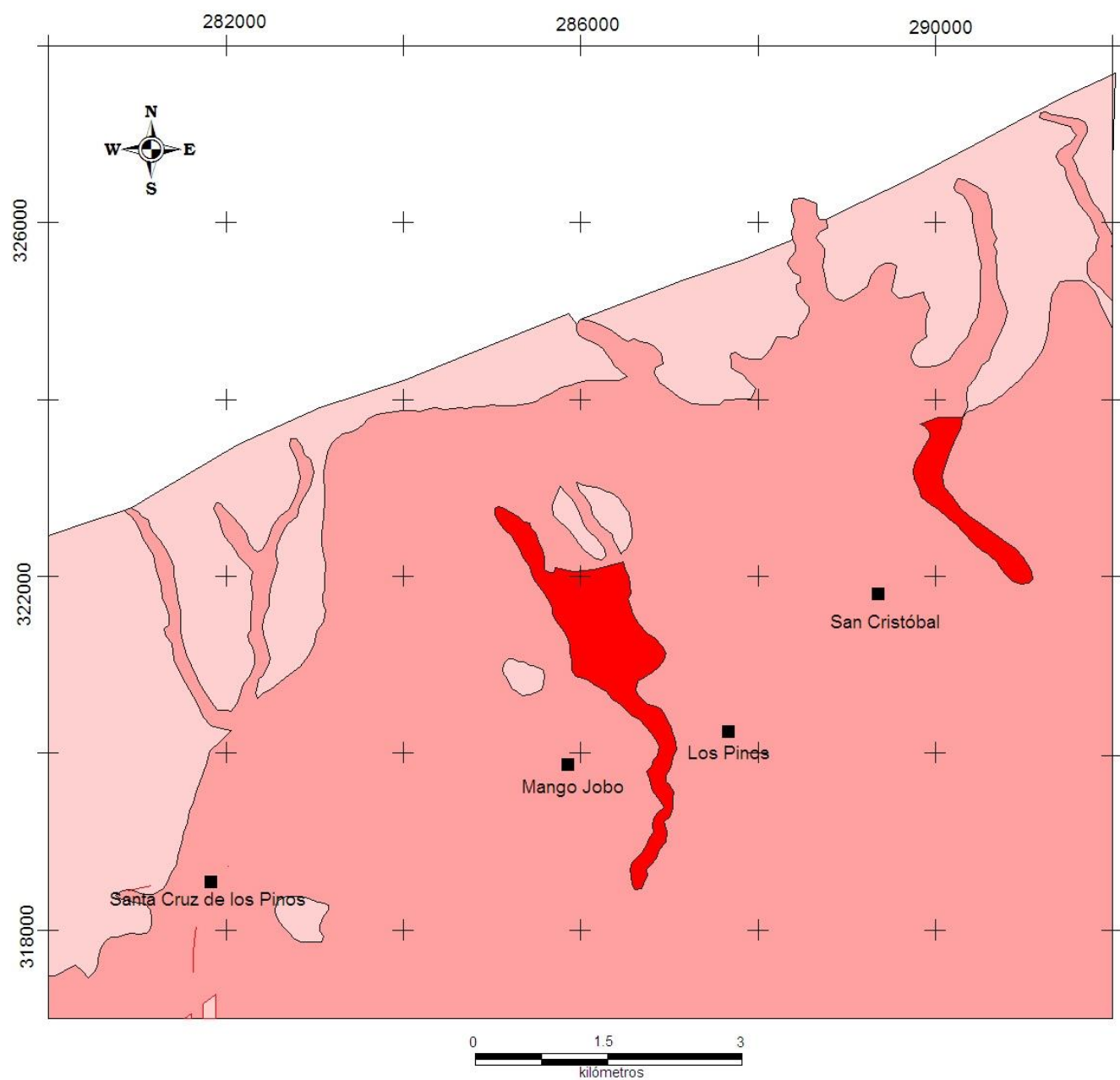
| Corte típico | Descripción | Variación de intensidad | Granito como patrón |
|--------------|---|--|---------------------|
| 1 | Formaciones rocosas y semirrocosas, macizos cristalinos formando capas potentes compactas, no intemperizadas y no agrietadas, estructuras magmáticas cristalinas densas, formaciones sedimentarias de capas gruesas, metamórficas. | Disminuye 1 ó 2 | 0 |
| 2 | Formaciones constituidas por capas menos compactas de rocas y semirocas de gran potencia con yacencia normal o ligeramente plegadas, sin dislocaciones disyuntivas, no intemperizadas y no agrietadas. | Disminuye 1 | 0.7 – 1.1 |
| 3 | Estratos potentes (no menos de 10m) de suelo arcilloso seco con yacencia normal o plegada. | No varía | 1.2 – 1.6 |
| 4 | Estratos potentes (no menos de 10m) de suelos densos granulares y compactos secos. | No varía | 1.2 – 1.8 |
| 5 | Capas de suelos rocosos y semirrocosos de escasa potencia (entre 1 y 2 m) que alternan con capas finas de sedimentos friables. | No varía o aumenta 1 en capas estratificadas | 1.0 – 2.0 |
| 6 | Capas alternas de suelos rocosos y semirrocosos con espesor inferior a 1.0m, homogéneos formando capas no muy potentes (entre 5 y 10m). También suelos con variaciones faciales bruscas. | No varía o aumenta 1 en capas estratificadas | 1.0 – 2.0 |
| 7 | Suelos friables de potencia considerable inundados con nivel freático mayor que 5m. | No varía o aumenta 1 en capas húmedas. | 2.0 – 2.5 |
| 8 | Suelos friables de potencia considerable inundados con freáticos menores que 5 m o casi en la misma superficie (entre 1 y 3m). | Aumenta 1 | 1.6 – 2.4 |
| 9 | Suelos friables de menor potencia (entre 5 y 10m) inundados casi hasta la superficie (entre 1 y 3m). | Aumenta 1 a 2 | 1.6 – 2.0 |
| 10 | Sedimentos eluviales, rocosos, semirrocosos y arcillosos, semirrocosos en estado seco e inundados, convertidos en fragmentos angulosos o en formaciones friables areno arcillosas. | Aumenta 1 a 2 | 1.6 – 2.9 |
| 11 | Suelos friables de escasa potencia (menos de 5m) de capas finas (aluviales y deluviales) yacen sobre la superficie de formaciones compactas se incluyen los contactos deluviales, aluviales y otros tipos. | Aumenta 1 a 2 | 2.3 – 3.0 |
| 12 | Suelos arcillosos pantanosos o muy húmedos (lechos de ríos, turberas), inundados de agua hasta la superficie. | Aumenta 1 a 2 | 2.3 – 3.9 |
| 13 | Relleno de minerales otros materiales artificiales en estado seco o inundado, de potente yacencia o estratos finos. | Aumenta 1 a 2 | 2.3 – 3.9 |
| 14 | Suelos de yacencia inestable (gravitacional) en forma de desprendimiento o deslizamiento de material de escombros pequeños y grandes triturados (angulosos de diferente potencia). | Aumenta 1 a 2 | 2.3 – 3.9 |
| 15 | Suelos carbonatados rocosos y semirrocosos carsificados, fuertemente deformados, en los que han terminado los fenómenos de alteración y trituración, aquí se incluyen los suelos de las zonas de trituración y destrucción por trabajos mineros o de extracción de rocas. | Aumenta 1 a 2 | 2.0 – 4.0 |
| 16 | Contacto de rocas ígneas intrusivas o efusivas con rocas metamórficas o sedimentarias y otros suelos, contacto de la intrusión con los suelos donde se intruye. | Aumenta 1 a 2 | 1.0 – 4.0 |
| 17 | Avalanchas o desprendimientos antiguos detenidos en | Aumenta 1 a 2 | 1.0 – 4.0 |

| Corte típico | Descripción | Variación de intensidad | Granito como patrón |
|---------------------|---|--------------------------------|----------------------------|
| | estado seco de diferentes materiales y desprendimientos activos de diferentes tipos y espesor del cuerpo de la avalancha impregnados de agua. | | |
| 18 | Rocas donde se desarrollan fallas inversas o desplazamiento lateral, que afloran a la superficie o están en marcadas por sedimentos friables secos o saturados. | Aumenta 2 | 3.0 – 4.0 |

Anexo VI. Clasificación de los suelos según su comportamiento sísmico.
Comparación de las normas NC 46: 1999 y NCSE-02 (Elaboración propia).

| Norma Cubana NC 46: 1999 | | Norma Española NCSE-02 | | |
|--------------------------|--|------------------------|--|----------------|
| Perfil tipo | Descripción | Tipo de terreno | Descripción | Coefficiente C |
| S1 | Roca de cualquier tipo, sedimentaria o cristalina. Puede caracterizarse por una velocidad de propagación de la onda cortante mayor de 800 m/s. Suelos rígidos de un espesor menor de 60 m hasta la base rocosa, siempre y cuando los estratos superiores estén compuestos por depósitos estables de arenas, gravas o arcillas duras. Puede caracterizarse por una velocidad de propagación de la onda cortante entre 450 m/s y 750 m/s. Sus períodos están comprendidos entre 0.3 s y 0.5 s. | I | Roca compacta, suelo cementado o granular muy denso, $V_s > 750$ m/s. | 1.0 |
| | | II | Roca muy fracturada, suelos granulares densos o cohesivos duros, V_s entre 750 y 400 m/s. | 1.3 |
| S2 | Depósitos estables de suelos no cohesivos o arcillas duras cuando su profundidad hasta la base rocosa excede los 60 m y los estratos superiores están compuestos por arenas, gravas o arcillas duras. Puede caracterizarse por una velocidad de propagación de una onda de cortante entre 240 m/s y 450 m/s. Sus períodos están comprendidos entre 0.5 s y 0.8 s. | III | Suelo granular de compacidad media, o suelo cohesivo de consistencia firme o muy firme, V_s entre 400 y 200 m/s. | 1.6 |
| S3 | Depósitos de arcillas blandas o medias y arenas con espesores de 10 m o más con o sin presencia de capas intermedias de arenas u otra clase de suelos no cohesivos. Puede caracterizarse por una velocidad de propagación de una onda de cortante menor de 240 m/s. Sus períodos están comprendidos entre 0.8 s y 1.2 s. | IV | Suelo granular suelto, o suelo cohesivo blando. $V_s < 200$ m/s. | 2.0 |
| S4 | Depósitos de arcilla blanda con espesores mayores de 12 m. Puede caracterizarse por una velocidad de propagación de una onda cortante menor que 150 m/s. Sus períodos serán mayores de 1.2 s. | | | |

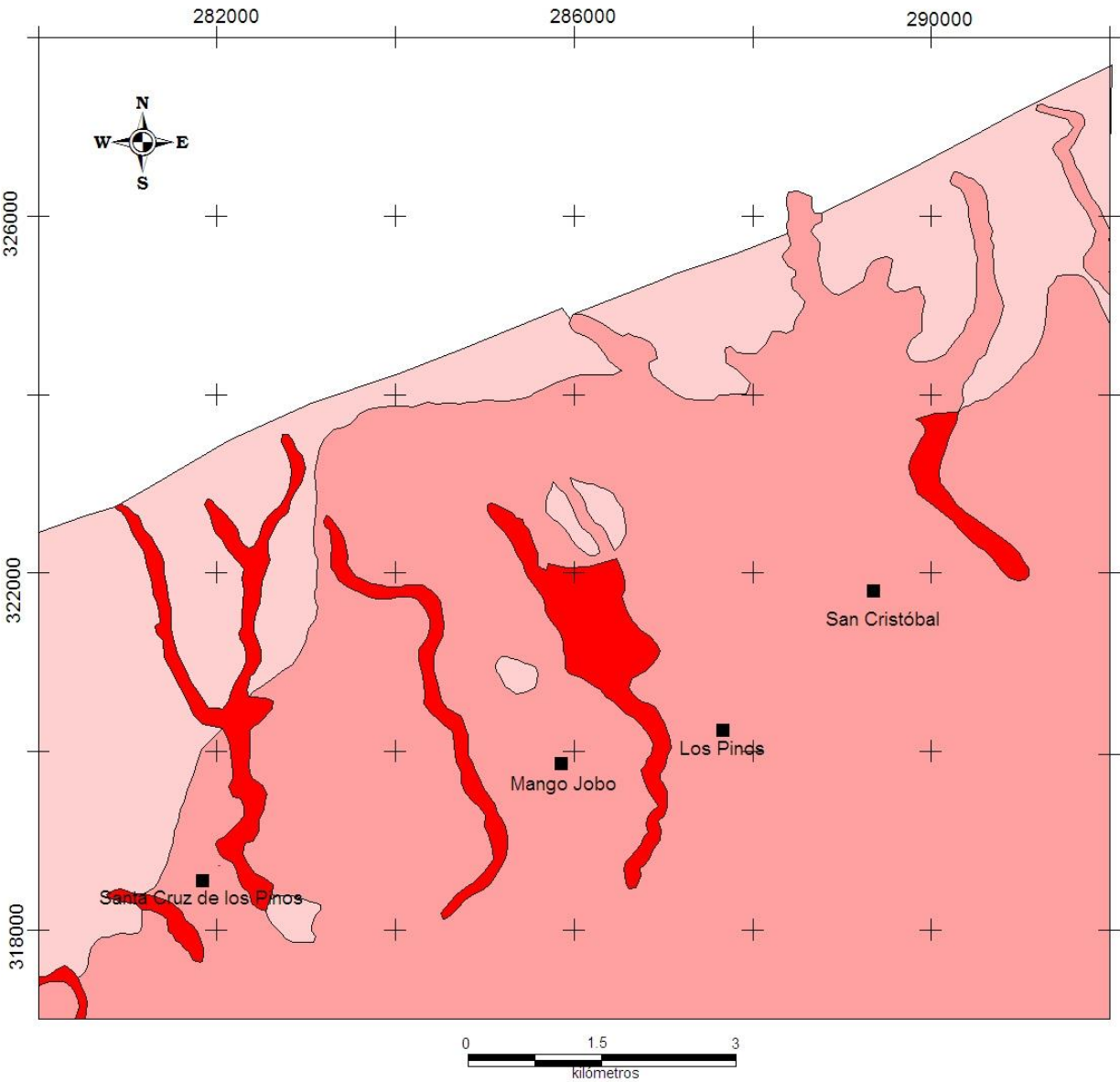
Anexo VII. Mapa de incremento de la intensidad sísmica respecto a la roca granítica. Obtenido por el método de analogías ingeniero geológicas. San Cristóbal, Cuba. Escala original 1:25 000.



LEYENDA

| Método de analogías ingeniero geológicas | | |
|--|--------------------------------|---------------------|
| | Corte tipo, según Popov (1959) | ΔI (Grados) |
| | 12 | 2.3 – 3.9 |
| | 8 | 1.6 – 2.4 |
| | 5 | 1.0 – 2.0 |

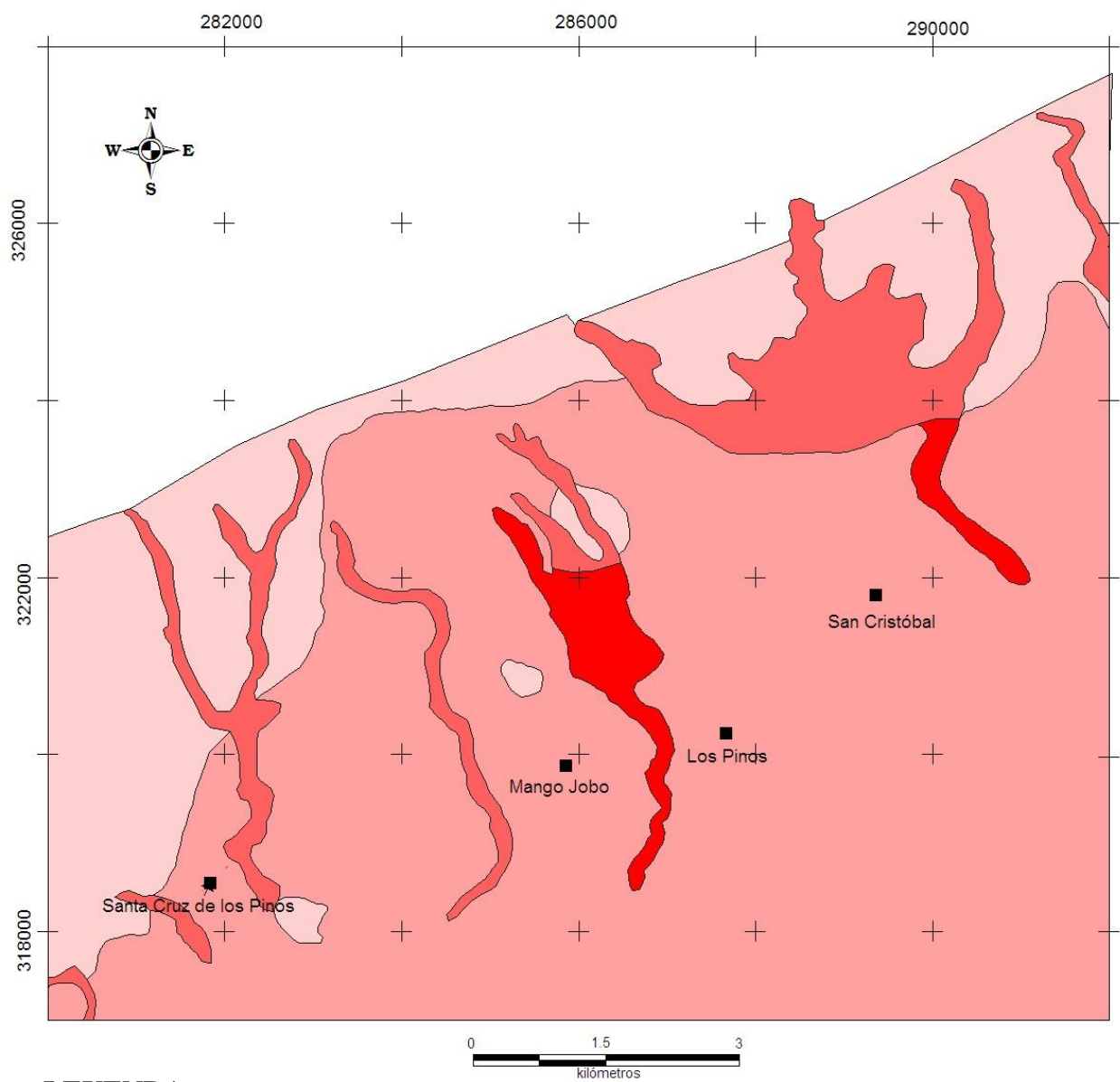
Anexo VIII. Mapa de incremento de la intensidad sísmica respecto a la roca granítica. Obtenido por el método de rigidez acústica. San Cristóbal, Cuba. Escala original 1:25000.



LEYENDA

| ΔI (grados) | |
|------------------------|-----------|
| | 2.4 - 2.5 |
| | 2.0 - 2.3 |
| | 1.2 |

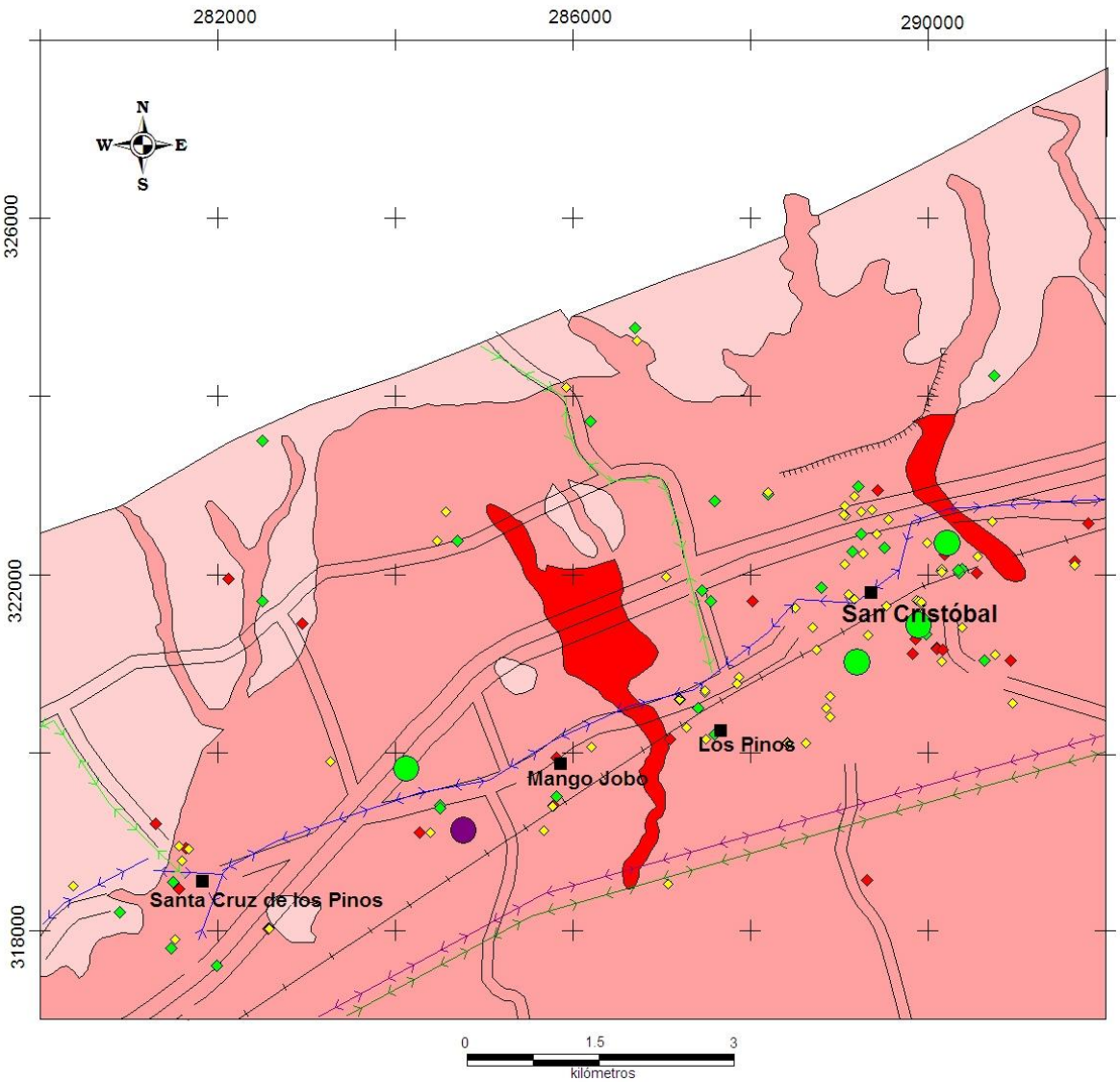
Anexo IX. Mapa del comportamiento del coeficiente de amplificación del terreno
C. San Cristóbal, Cuba. Escala original 1:25 000.



LEYENDA

| | Coeficiente de amplificación C |
|--|-----------------------------------|
| | Mayor que 1.8 |
| | 1.7 – 1.8 |
| | 1.6 – 1.7 |
| | Menor que 1.6 |

Anexo X. Mapa con la relación espacial entre la infraestructura socioeconómica y la peligrosidad sísmica local. San Cristóbal, Cuba. Escala original 1:25 000.



LEYENDA

| ΔI (grados) | C | Peligrosidad sísmica local |
|------------------------|------------------|-------------------------------|
| 2.5 | Mayor que 1.8 | Alta |
| 2.0 – 2.4 | 1.6 – 1.8 | Media |
| 1.2 | Menor que 1.6 | Baja |

| | |
|--|----------------------------|
| | Subdivisión por manzanas |
| | Instalaciones del MINSAP |
| | Instalaciones de educación |
| | Industrias |
| | Línea eléctrica de 13 kv |
| | Línea eléctrica de 33 kv |
| | Línea eléctrica de 110 kv |
| | Línea eléctrica de 220 kv |
| | Subestación 33/13kv |
| | Subestación 110 kv |
| | Carreteras |
| | Dique de embalse |